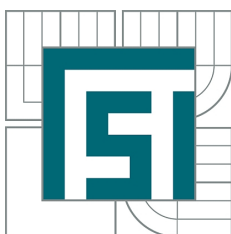


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# KONFIGURACE HNACÍCH ÚSTROJÍ HVĚZDICOVÝCH MOTORŮ

POWERTRAIN CONFIGURATION OF RADIAL ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

HYNEK SADOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Hynek Sadovský

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Konfigurace hnacích ústrojí hvězdicových motorů**

v anglickém jazyce:

### **Powertrain configurations of radial engines**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Shromáždit poznatky o provedení hnacích ústrojí hvězdicových pístových spalovacích motorů.

Cíle bakalářské práce:

Soustředit dostupné poznatky o konstrukčním provedení hnacích ústrojí hvězdicových pístových spalovacích motorů, zejména pro letecké aplikace.

Seznam odborné literatury:

STONE , Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire : Palgrave, 1999. 641 s. ISBN 0-333-74013-0.

Kraftfahrzeug - Kurbelwellen : Konstruktion, Berechnung, Herstellung. 2001. Auflage. Landsberg/Lech Verlag Moderne Industrie 2001. 70 s. ISBN 3-478-93243-2.

Hafner, K.E., Maass, H.: Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine, Springer-Verlag Wien-New York 1995

HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

Internet.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce pojednává o hvězdicových motorech a konkrétně rozebírá různá konstrukční řešení. Je zde zmíněna základní teorie fungování, spolu s požadavky a historií. Jako hlavní jsou zde rozebrány konstrukční skupiny hvězdicového motoru spolu s jejich možnými řešeními.

## **Summary**

This bachelor thesis deals with the radial engines, and specifically discusses the various design solutions. There is mention of the basic theory of operation, together with the requirements and history. As the main topic there are discussed different parts of radial engines with their possible configurations.

## **Klíčová slova**

motor, hvězdicový, letadlový, pístový, bakalářská práce, VUT v Brně.

## **Keywords**

engine, radial, aircraft, piston, bachelor thesis, BUT Brno

SADOVSKÝ, H. *Konfigurace hnacích ústrojí hvězdicových motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 43 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc..



Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Konfigurace hnacích ústrojí hvězdicových motorů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce prof. Ing. Václava Píštěka, DrSc. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 24.5.2013

Hynek Sadovský



Děkuji všem, kteří mi pomohli s tvorbou této práce, zejména mému vedoucímu, prof. Ing. Václavu Píštěkovi, DrSc. za jeho pomoc a mojí mamince za podporu při studiu.

Hynek Sadovský

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2 Požadavky na pístové motory, historie a základní rozdělení</b>	<b>4</b>
2.1 Požadavky na letadlový motor	4
2.1.1 Dostatečný výkon	4
2.1.2 Výškovost	5
2.1.3 Nízká hmotnost a další požadavky	5
2.2 Rozdělení a varianty pístových motorů	7
2.3 Historie	8
2.3.1 Počátek 20. století a předválečné období	8
2.3.2 1. světová válka	9
2.3.3 Meziválečné „zlaté“ období	10
2.3.4 2. světová válka a poválečné období	10
<b>3 Rozbor konstrukce motoru</b>	<b>12</b>
3.1 Klikový hřídel	13
3.1.1 Tvar hřídele a pořadí zážehů	13
3.1.2 Silové poměry na klikové hřídeli	15
3.1.3 Konstrukční řešení klikových hřídelí	15
3.2 Ojnice	17
3.3 Píst, pístní kroužky a pístní čep	18
3.3.1 Píst	19
3.3.2 Pístní kroužky	20
3.3.3 Pístní čep	21
3.4 Válec a hlava válce	22
3.4.1 Chlazení kapalinou	22
3.4.2 Chlazení vzduchem	23
3.5 Rozvodové ústrojí	24
3.5.1 Ventily a ovládání	24
3.5.2 Vačky a časování	25
3.6 Reduktor	28
3.7 Kliková skříň a motorové lože	29
<b>4 Pomocné agregáty a soustavy</b>	<b>32</b>
4.1 Kompresor	32
4.2 Mazací soustava	33
4.3 Chladicí soustava a kryty motoru	33
4.4 Palivová soustava	36
4.4.1 Karburátory	36
4.4.2 Přímé vstřikování	37
4.5 Zapalovací soustava	37
4.6 Spouštěcí soustava	37
4.7 Protipožární a odmrazovací soustava	39
<b>5 Závěr</b>	<b>40</b>



# 1. Úvod

Hvězdicový motor je velmi zajímavé konstrukční řešení spalovacího motoru, které se vyvinulo na počátku 20. století - spolu s řadovým motorem - jako nejlepší konstrukční varianta letadlového motoru. Až do 60. let 20. století byl hojně používán, například pro dopravní letouny a přispěl tak velkou mírou k rozvoji civilního dopravního letectví v poválečné době. Postupně byl však vytlačen motory turbínovými a proudovými. Historii a použití se práce bude také okrajově v úvodní kapitole věnovat.

Svoji dobu slávy má již za sebou, ale dále udivuje svoji majestátností, výkony a krásou konstrukčního řešení. Čím více se o motoru člověk dovídá, tím více se musí podívat nad šikovností tehdejších konstruktérů, technologů a dělníků, kteří museli prokázat velikou dávku pečlivosti, technické odbornosti a zápalu vyřešit mnoho problémů, které se vyskytly po cestě od rýsovacího prkna do finální montáže. V dnešní době stále používán je, zejména v oblasti leteckých modelů. Mimo to se najde mnoho starých motorů z sestřelených nebo vyřazených letadel, které se restaurují, opravují a vrací sem jim jejich původní lesk.

Hlavní cíl práce je tedy shrnutí informací do kompaktního a pokud možno stručného celku, který dá čtenáři ucelený přehled o konstrukci těchto motorů.

## 2. Požadavky na pístové motory, historie a základní rozdělení

### 2.1. Požadavky na letadlový motor

Letadlový motor je zařízení, na které je kladeno hodně požadavků, často protichůdných. Z pohledu pístových motorů se s nimi nejlépe dokáží vypořádat hvězdicové a řadové pístové motory, ale vždy záleží na konkrétní aplikaci motoru, jelikož se požadavky, respektive jejich priority mění v závislosti zda se jedná například o motor pro dopravní, či stíhací letoun. V této kapitole si uvedeme jednotlivé hlavní požadavky [2, strana 16].



Obrázek 2.1: Uložený hvězdicový motor s vrtulí v letounu [10]

#### 2.1.1. Dostatečný výkon

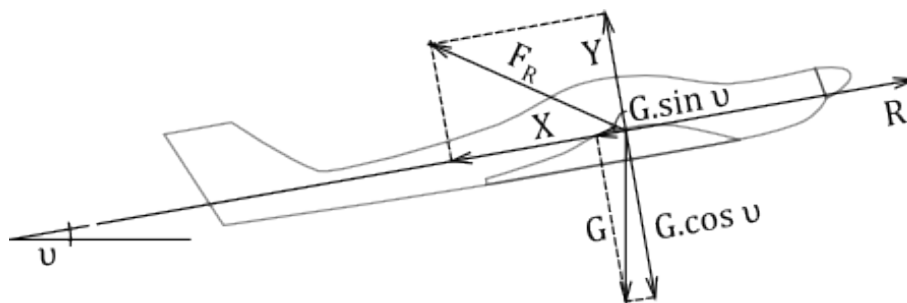
Nejdůležitější požadavek na letadlový motor je jeho výkon, respektive tah. Je třeba znát síly působící na letadlo, které musí tah motoru překonat. Z obr. 2.2 vidíme, že na letoun ve vzduchu působí

**Tah** motoru vzniká urychlováním proudu vzduchu, který obtéká motor, tedy změnou hybnosti tekutiny před a za motorem (na kontrolních plochách). Tah motoru dle rovnice

$$R = \dot{m} \cdot (c_2 - c_1) \quad (2.1)$$

Hmotnostní tok i rozdíl rychlostí ovlivňuje výkon motoru samotného, ale ve velké míře i geometrie a otáčky vrtule. Tvar vrtule se s časem velice zásadně měnil, s postupem času a vědeckého vývoje se ustálil na dnešním známém tvaru cca v 30. letech 20. století. V té je vynalezena vrtule s přestavitelnými listy, dekádu později se začínají objevovat stavitelné

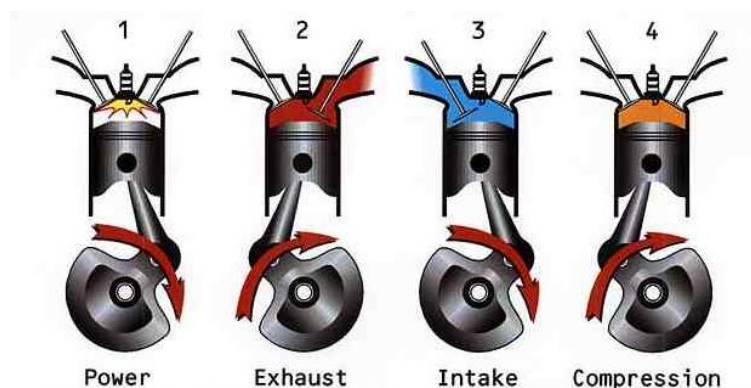
## 2. POŽADAVKY NA PÍSTOVÉ MOTORY, HISTORIE A ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ



Obrázek 2.2: Síly na letounu, zdroj: vlastní

vrtule umožňující měnit nastavení listů v průběhu letu, a to mechanicky, hydraulicky nebo elektricky [2, str. 61].

Cyklus čtyřdobého motoru je naznačen na obr. 2.3:



Obrázek 2.3: Spalovací cyklus čtyřdobý

1 - výbuch, 2 - výfuk, 3 - sání, 4 - komprese

Na následujícím obrázku 2.4 je zobrazen idealizovaný p-V diagram čtyřdobého motoru (Ottův cyklus) [3]:

### 2.1.2. Výškovost

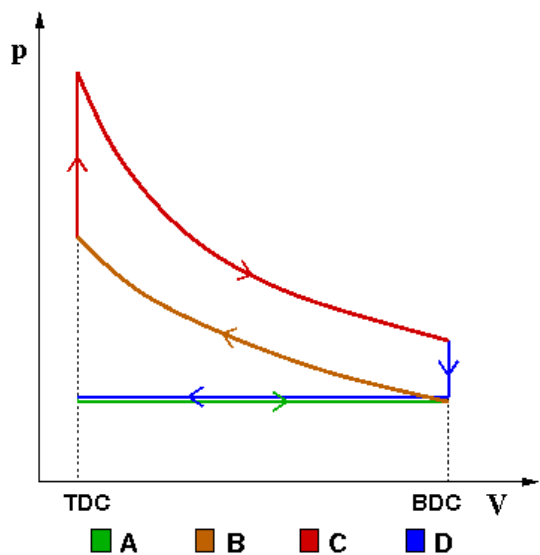
Výškovost motoru vyjadřuje závislost výkonu motoru na nadmořské výšce. Tato vlastnost je diametrálně liší u motorů atmosférických (nepřepřňovaných) s nasáváním vzduchu a přepřňovaných s jednostupňovým nebo dvoustupňovým kompresorem. Nepřepřňované motory s výškou výkon ztrácejí, jelikož klesá hustota plnicího vzduchu. Přepřňované motory naopak s výškou výkon zvyšují teoreticky neustále. V reálu je to pouze do tzv. „kritické výšky“, kde již přepřňovací jednotka není schopna dále udržet konstantní plnicí tlak a nad touto výškou se výkonová křivka láme a výkon motoru klesá. Téměř všechny dnešní motory jsou přepřňované, jelikož to poskytuje velké výhody. Výkon se zvyšuje až o 100% a tudíž měrná hmotnost rapidně klesá.

### 2.1.3. Nízká hmotnost a další požadavky

- Dostatečný výkon
- Výškovost



## 2.1. POŽADAVKY NA LETADLOVÝ MOTOR



Obrázek 2.4: p-V diagram čtyřdobého motoru [18]

A - sání (izobara), B - komprese (adiabatická komprese s navazující izochorou), C - výbuch (adiabatická expanze), D - výfuk (izobara)

- Nízká (měrná) hmotnost
- Hospodárnost, dolet
- Malé rozměry
- Provozní spolehlivost
- Dlouhá životnost
- Vyvážení
- Snadný provoz, údržba a obsluha
- Jednoduchá výroba

## 2.2. Rozdělení a varianty pístových motorů

Motory se dají rozřadit do různých skupin dle různých kritérií [2, strana 15-16]:

- Druh paliva
  - lehké palivo - zážehové motory
  - těžké palivo - vznětové motory
- Pracovní oběh
  - Čtyřdobé
  - Dvoudobé
- Uspořádání válců
  - Motory řadové
    - Jednořadové/dvouřadové stojaté
    - Jednořadové/dvouřadové visuté
    - Dvouřadové s protilehlými válci (ploché)
    - Třířadové (motor W)
    - Čtyřřadové (motor H nebo X)

### **Motory hvězdicové**

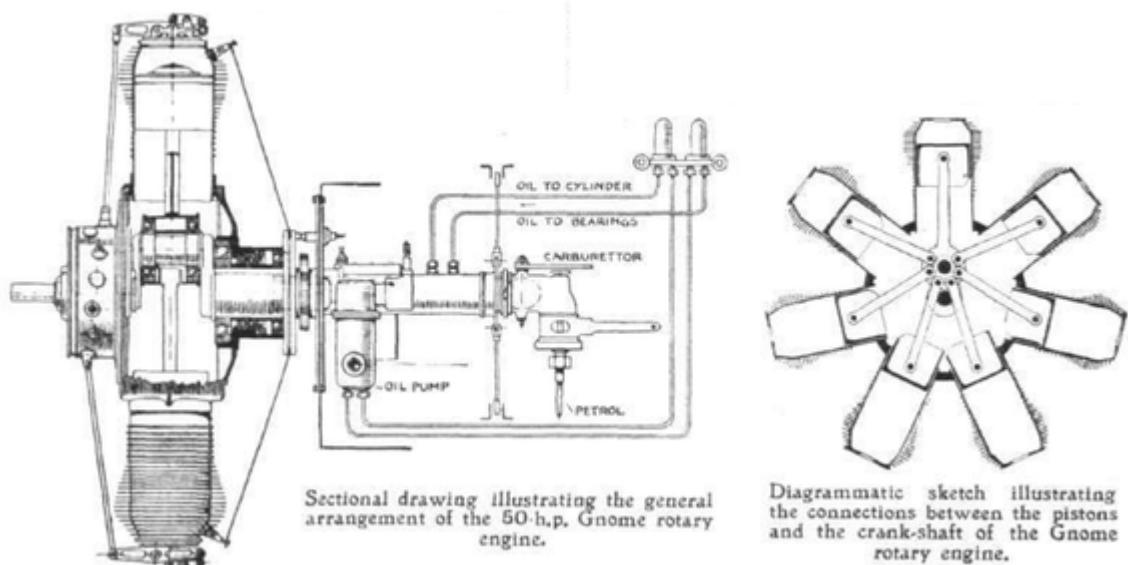
#### **Jednohvězdicové**

#### **Vícehvězdicové** (obvykle 2-4 hvězdice)

#### **Rotační**

Rotační hvězdicový motor vznikl jako předchůdce k hvězdicovému motoru a používal se hlavně v počátcích. U rotačního motoru je klikový hřídel „pevný“ (osa otáčení) a kliková skříň s válci celá rotuje. Toto řešení se používalo u vzduchem chlazených motorů, kde bylo nutné zajistit dostatečný hmotnostní tok vzduchu pro potřeby chlazení. Používané slitiny kovů neměly ideální charakteristiky z pohledu pevnosti a teplotní odolnosti, v kombinaci s nízkou rychlostí letadel bylo správné chlazení veliký problém. Rotací celého motoru se tento problém podařilo vyřešit.

## 2.3. HISTORIE



Obrázek 2.5: Schématický řez rotačním motorem Gnome [8]

## 2.3. Historie

Uplně první vznikly hvězdicové rotační motory, uspořádání bylo patentováno roku 1888 a použito bylo v jízdním kole. Dále byla tato koncepce použita v automobilu roku 1894. Další motory již měly pro svou vhodnou koncepci hlavní určení do leteckých aplikací.

Počátky pístových motorů v letectví se datují na přelom 19. a 20. století. První neúspěšné pokusy o let se datují již do 9. století. Slavný Leonardo da Vinci ve své knize, v originále nazvané: „Codex on the Flight of Birds“ z roku 1505 popisuje svoje poznatky z pozorování letu ptáků a navrhuje několik konstrukcí leteckého stroje. Všechny tyto a i další pokusy s konstrukcí těžší než vzduch více či méně selhaly, jelikož postrádaly hnací jednotku a lidská síla na let nestačila. Jako první pohonné jednotky byly použity parní stroje, a to u vzducholodí, tak i u letadel, tam konkrétně v roce 1890 s výkonem 14,7 kW. Parní stroje však naprosto nevyhovovali požadavkům, které jsme si uvedli v minulé kapitole 2.1. Až další rozvoj materiálů, technologií výroby a konstrukčních řešení umožnil použití pístových motorů v letectví.

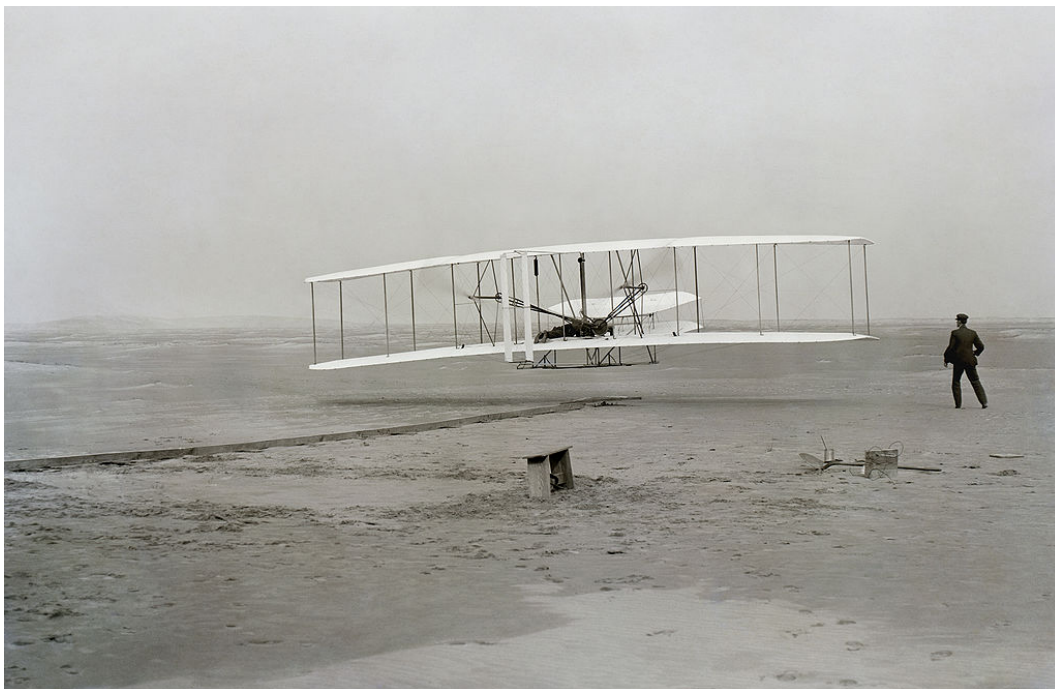
### 2.3.1. Počátek 20. století a předválečné období

První pístový motor v letadle byl použit v roce 1903 bratry Wrightovými. Motor měl výkon 8,8 kW a hmotnost kolem 100 kg. Byl použit pro 1. oficiální kontrolovaný let konstrukce těžší než vzduch (obr. 2.6).

Tímto milníkem se rozvoj letadlových motorů prudce urychlil a rozdělil se na dvě hlavní větve - motory vzduchem chlazené a motory chlazené kapalinou. Rychlost vývoje je vidět na růstu výkonů, spolehlivosti a délky letu, např. již v 1909 byl překonán Lamanšský průliv. Pohonné jednotky se dále zlepšovaly, mimojiné i díky začlenění letectva do armády - poprvé v akci nasazeno Italskou armádou v roce 1911.

Z mnoha variant uspořádání motorů se v té době nejvíce prosadily právě varianty vzduchem chlazené jednořadové a hvězdicové rotační motory. Velice známé byly rotační

## 2. POŽADAVKY NA PÍSTOVÉ MOTORY, HISTORIE A ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ



Obrázek 2.6: Let bratrů Wrightových [20]

motory francouzské firmy Gnome (později Gnome et Rhône). Významné modely tohoto období:

- Gnome 7 Omega (1908)  
vzletový výkon: 50 HP  
první sériově vyráběný
- Salmson A7 (1911)  
vzletový výkon: 80-100 HP  
vodou chlazený

### 2.3.2. 1. světová válka

Válka usnadnila vývoj všech technologií souvisejících s válečným usilím. Mimo jiné se poprvé dostalo ke slovu letectvo, strategický význam byl již v té době velice podstatný. Rotační hvězdicové motory měly v té době nejlepší měrnou hmotnost [5]. Největší nevýhody rotačních motorů byla velká spotřeba paliva - motor většinou běžel v maximálních otáčkách, časování a spalování bylo dosti nedokonalé a největší nevýhoda bylo vysoká spotřeba maziva. Vdechování výfuků spáleného oleje, který se přimíchával do směsi, způsoboval pilotům zdravotní potíže. Významné modely tohoto období:

- Le Rhône 9Ja (1916)  
vzletový výkon: 110 HP  
nejpoužívanější rotační motor své doby
- Siemens-Halske Sh.III

## 2.3. HISTORIE

vzletový výkon: 160 HP

motor rotoval oproti vrtuli

### 2.3.3. Meziválečné „zlaté“ období

Tato fáze letecké historie je rovněž poznamenána překotným vývojem, hlavně v oblasti civilního létání. Kupředu šla nevojenská část díky dostupnosti bývalých vojenských letadel a jejich civilních verzí a dílů. Stejně tak měly velký vliv i peníze nabízené za to být první, např. let přes atlantik, kolem světa a další. Konstrukteři letadel (nejznámější William B. Stout a Andrei Tupolev) začali používat celokovové konstrukce letadel. S tím je spojena narůstající hmotnost a rozměry letadel a potřeba výkonnějších motorů. Právě v tomto období se prosazují vzduchem chlazené hvězdicové motory s pevnými válci jako spolehlivé, lehké a výkonné. Vznikají nové konstrukční prvky a řešení - vznikají první reduktory jako reakce na zvyšování otáček, dále i odstředivé kompresory pro zlepšení výškovosti [2] 2.1.2.

Významné modely tohoto období:

- Bristol Hercules (1936)

vzletový výkon: 1272 HP

šoupátkový rozvod

- Pratt & Wright R-1820 (1930)

vzletový výkon: 575 - 1525 HP

použit ve známých letadlech Douglas DC-1, DC-2, DC-3

### 2.3.4. 2. světová válka a poválečné období

V 2. sv. válce již bylo letectvo bráno jako jedna z hlavních součástí armády. Hvězdicové motory se používaly ve všech typech letadel. Většinou se uplatnily ve velkých, např. transportních letounech. V této době byly v malých, např. stíhacích letounech konstruktéry upřednostňovány řadové pístové motory, kvůli menší čelní ploše, tudíž menšímu odporu vzduchu. Krásný příklad je Supermarine Spitfire s motorem Rolls-Royce PV-12 „Merlin“. Na druhou stranu existovalo několik stíhacích letounů s motorem hvězdicovým jako byl výborný Focke-Wulf 190 s hvězdicovým motorem BMW 801 2.7. Výhoda hvězdicových motorů spočívá ve schopnosti snést větší poškození v boji než jeho řadový kolega. V poválečném období se výkon motorů dále zvyšoval a rozvoj byl rychlý. To vše končí nástupem lopatkových motorů a pístové motory jsou vytlačeny k menším letadlům a pro menší výkony. Hvězdicové motory postupně končí.

Významné modely tohoto období:

- BMW 801 (1939) 2.7

vzletový výkon: 1539 HP

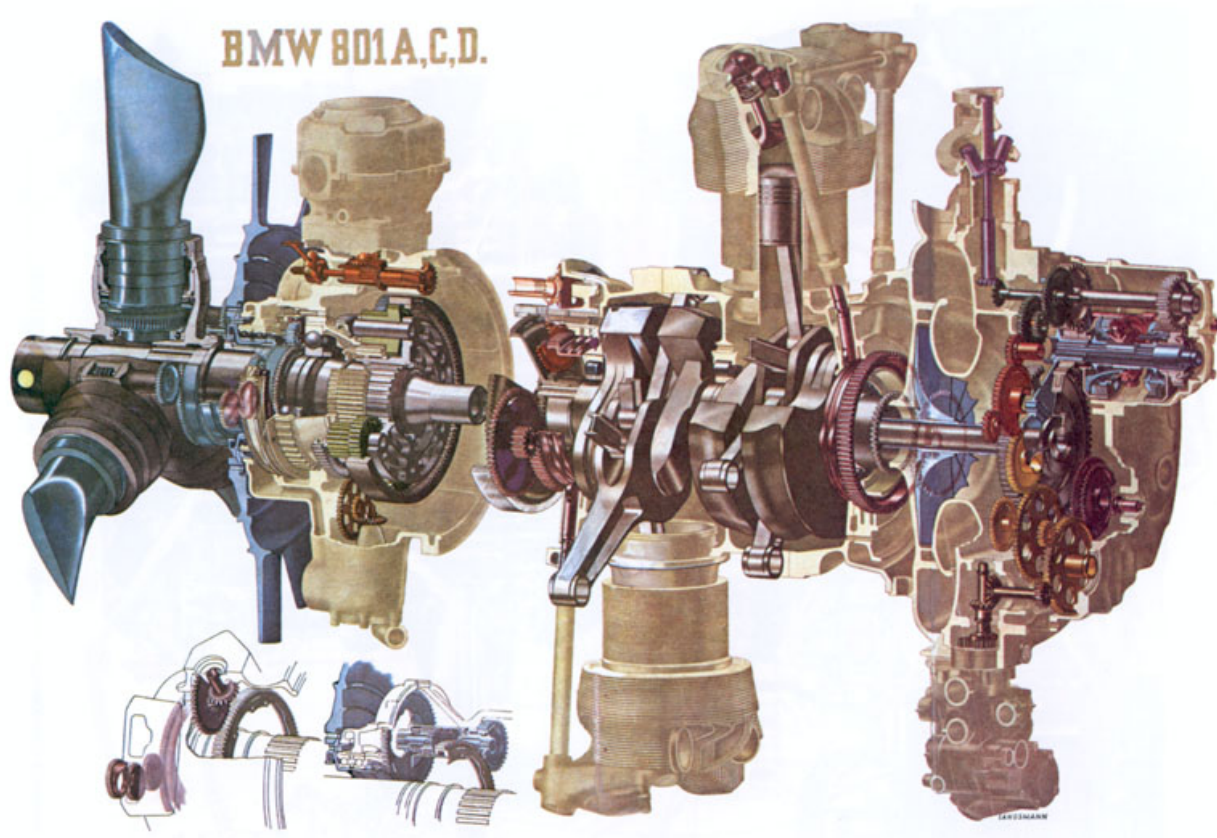
nejpokročilejší řídicí jednotka své doby 4

- Švecov AŠ-82 (1940)

vzletový výkon 1570 HP

vyrobena přes 70 000 ks

## 2. POŽADAVKY NA PÍSTOVÉ MOTORY, HISTORIE A ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ



Obrázek 2.7: BMW 801 [16]

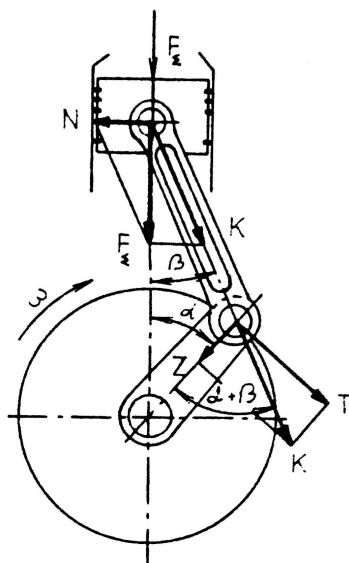


### 3. Rozbor konstrukce motoru

V této kapitole se budeme postupně zabývat konkrétními částmi hvězdicového letadlového motoru na lehká paliva, jelikož ten je v leteckých aplikacích nejvíce zastoupen. Motory na těžká paliva (naftové) se díky těžší konstrukci nerozšířily. Nejdříve si uvedeme některé zvláštnosti a odlišnosti konstrukce a namáhání letadlových motorů [4, str. 84] oproti běžným motorům, které úzce souvisí s požadavky uvedenými v kap. 2.1. Hlavní je v tomto případě požadavek na nízkou (měrnou) váhu a vysoký (litrový) výkon.

Obecně jsou všechny součásti motoru zatíženy větším mechanickým namáháním, s tím je spojeno i větší zatížení třecích ploch. Dále pak skupina zahříváných součástí (válec, vál. hlava, píst, ventily atd.) musí zvládat mnohem větší teplotní zatížení a také větší nerovnoměrnost zahřívání.

Srdce motoru tvoří klikový mechanismus, který se stará o převod přímočarého pohybu na pohyb rotační. Klikový mech. se skládá hlavně z klikové hřídele, ojnice a pístu.



Obrázek 3.1: Rozklad sil v klikovém mechanismu [2, str. 36]

Spalovací komoru tvoří válec a hlava válce, ve které jsou zpravidla uloženy sací a výfukové ventily, svíčka.

U letadlových motorů vyšších otáček je na výstupu přítomen reduktor pro snížení otáček pro vrtuli na správné hodnoty po nejvyšší účinnosti vrtule.

Časování ventilů probíhá u hvězdicových motorů pomocí tzv. vačkových kotoučů, které hýbají se zdvihátky a následně s vahadlem, které svým koncem stlačí (otevře) ventil dolů. Vracení je zajištěno pružinou.

Pro správnou funkci motoru jsou nutná další zařízení - čerpadla (olejová, palivová, popř. vodní), kompresor, spouštěcí zařízení, elektrické generátory, magneta, senzory tlaku a teploty, karburátor a další. Poháněna jsou pomocí klikové hřídele a ozubených kol o potřebném převodu.

Všechny tyto součásti hvězdicového motoru jsou uchyceny na klikové skříni. Jedná se o největší část motoru, přes kterou se celý motor uchytlí do lože.

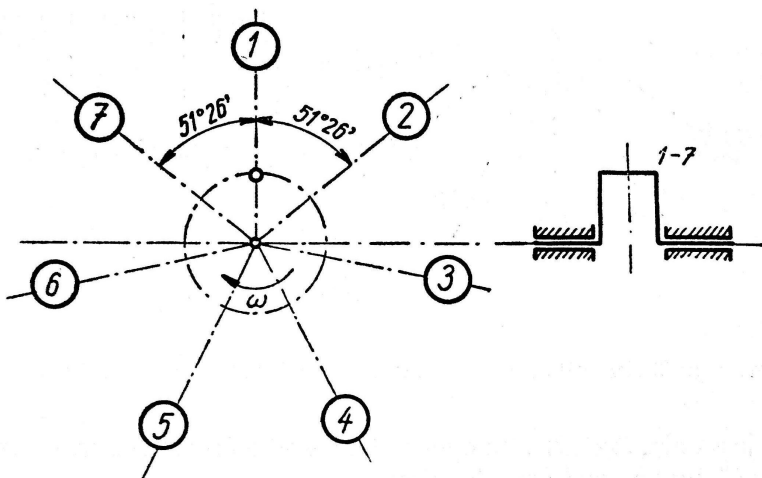
### 3.1. Klikový hřídel

#### 3.1.1. Tvar hřídele a pořadí zážehů

Hlavní část každého spalovacího pístového motoru, která koná rotační pohyb. Na klikový hřídel u hvězdicových motorů na jedno zalomení vázán pohyb všech pístů v dané řadě, v případě víceřadých motorů jsou tyto zalomení vůči sobě pootočený o  $180^\circ$  [4, str. 40]. Toto je úzce svázáno s pořadím zážehů. Jelikož pracovní perioda 4-dobých pístových motorů je  $720^\circ$  a  $i$  je počet válců, úhel  $\gamma$  se rovná:

$$\gamma = \frac{720}{i} \quad (3.1)$$

Za tuto periodu se musí vystřídat všechny zážehy válců. U hvěz. motorů zážehy v jedné řadě vycházejí ob jeden válec, a proto je počet válců vždy lichý, obvykle 7 nebo 9 v jedné řadě. Řady jsou oproti sobě natočeny o  $\frac{\gamma}{2}$ .



Obrázek 3.2: Schéma uspořádání válců jednohvězdicového motoru [4, str. 43]

Pořadí zážehů: 1 - 3 - 5 - 7 - 2 - 4 - 6 - 1.

Speciální případ nastává u čtyřhvězdicových motorů, kde již nelze hvězdy v případě chlazení vzduchem poskládat standartním způsobem. Zde se volí úhel pootočení:

$$\psi_V = \frac{360}{i} \quad (3.2)$$

s tím, že maximální počet válců je 28. Úhel  $\gamma$  zůstává stejný. Mění se i uspořádání klikové hřídele, mezi jednotlivými zalomeními (I. - IV.) je úhel:

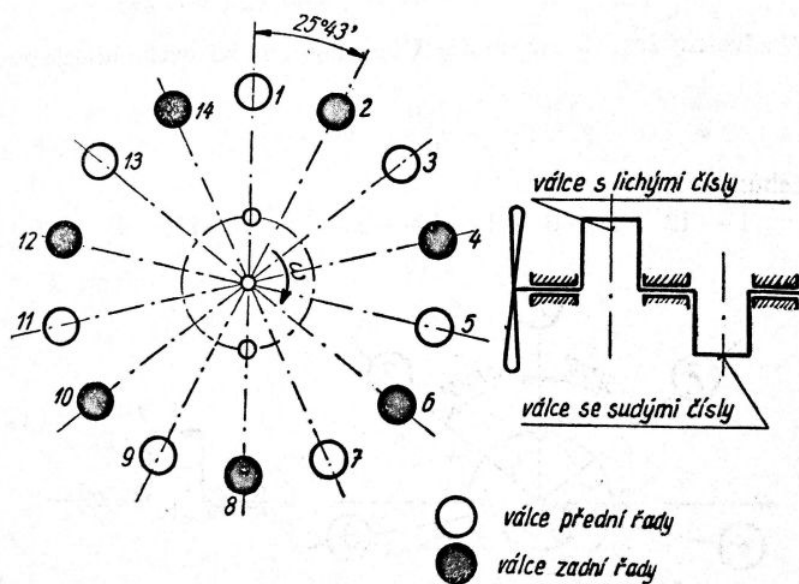
$$\psi_{k1} = 180^\circ + \psi_V \quad (3.3)$$

Pro čtyřhvězdicové motory chlazené kapalinou lze hvězdy navrhnout i se sudým počtem válců uspořádaných přímo za sebou v jedné rovině.

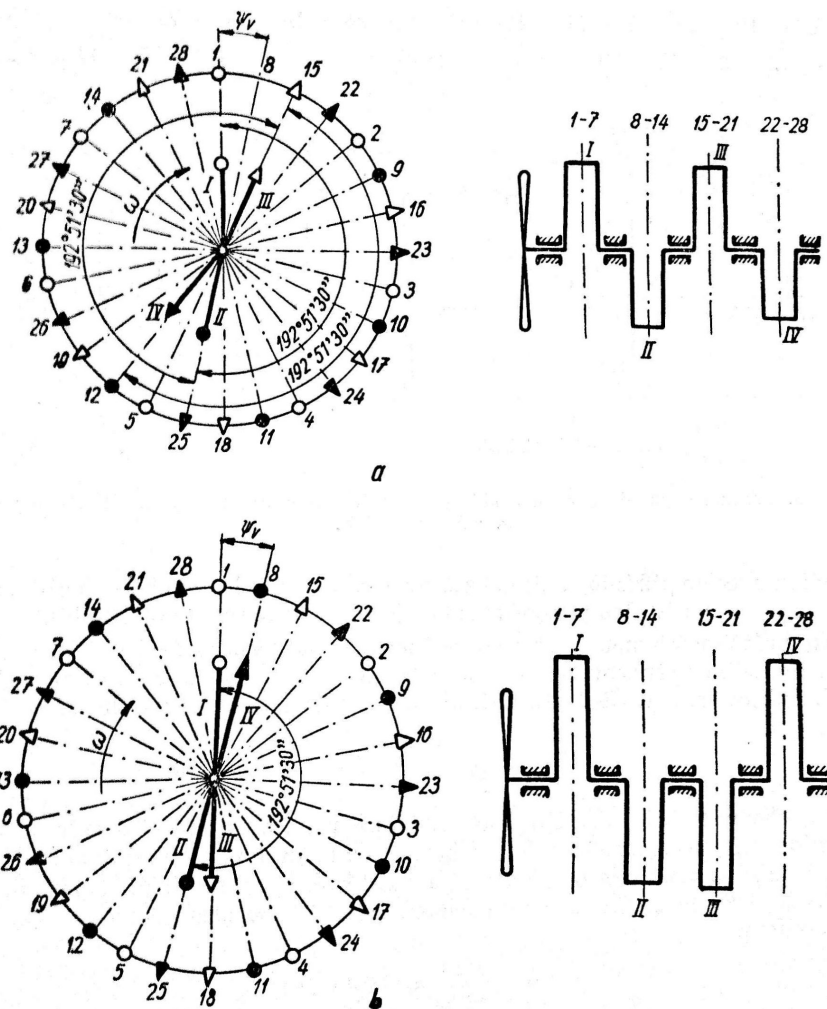
Varianata řešení se volí vždy taková, která zajistí nejplynulejší a nejrovnoměrnější chod motoru.



### 3.1. KLIKOVÝ HRÍDEL



Obrázek 3.3: Schéma uspořádání válců dvouhvězdicového motoru [4, str. 44]



Obrázek 3.4: Schéma uspořádání válců čtyřhvězdicového motoru [4, str. 45]

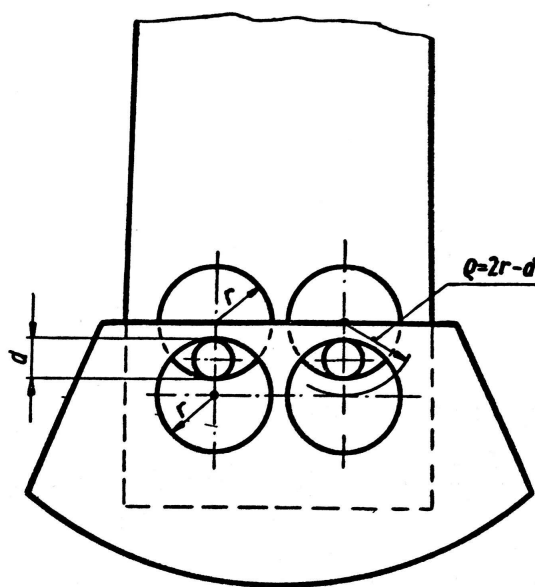
### 3.1.2. Silové poměry na klikové hřídeli

Klikový hřídel má za úkol přenášet energii z pohybu pístu, způsobeného výbuchem paliva, na vrtuli - rotační pohyb.

Na hřídel působí (obr. 3.1):

- tangenciální síly,
- normálové síly,
- odstředivé,
- reakční síly ložisek,
- síla od tahu vrtule a její gyroskopický moment, popř. mechanický odpor reduktoru,
- mechanický odpor pohonu pomocných soustav.

Všechny tyto zatížení se v čase periodicky mění a způsobují vynucené kmitání hřídele. To závisí na velikosti zatěžujících sil, tj. na otáčkách motoru. Potencionální nebezpečí vzniká v oblastech vlastních kmitů hřídele, kde při shodnosti obou frekvencí (při kritických otáčkách) dojde k rezonanci a prudkému nárůstu amplitudy kmitání. Zvyšuje se napětí v hřídeli a vzniká nebezpečí lomu. Problém kmitání se řeší kyvadlovým tlumičem, který bývá součástí protiváhy na rameni klikového hřídele.



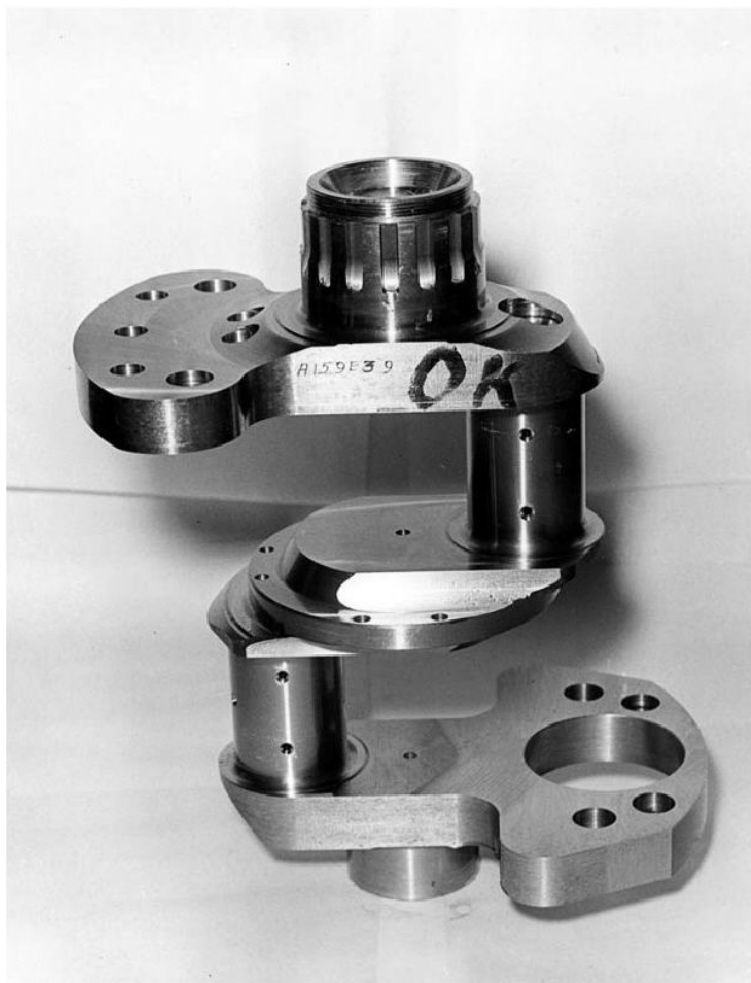
Obrázek 3.5: Bifilární kyvadlový tlumič [4, str. 200]

### 3.1.3. Konstrukční řešení klikových hřídelí

Klikový hřídel musí svým tvarem zajistit správné pořadí zážehů (3.1.1). Dále musí být tuhý, pevný a odolný vůči torzním kmitům.

Klikový hřídel se skládá z několika částí, jak je vidět na obrázku 3.6. Nahoře je hlavní čep na který se nasouvá hřídel vrtulový a ozubené kolo reduktoru, pokud je potřeba. To je připojeno na rameno klik. hřídele s protizávažím a navazuje ojniční čep. Dále pak může

### 3.1. KLIKOVÝ HŘÍDEL



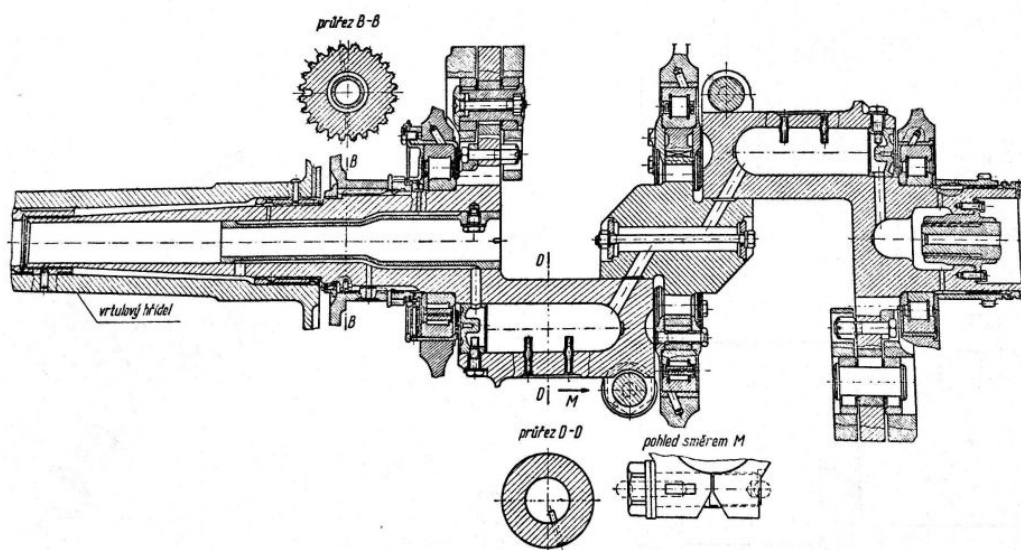
Obrázek 3.6: Klikový hřídel P&W R-1820 „Twin Wasp“ [14]

navazovat střední čep pro ložisko. V tomto případě je čep vynechán, na ojnicí čep je přímo připojeno rameno - oj. čep - rameno. Na konci je opět hlavní čep.

Klikový hřídel a jeho ložiska musí zachycovat radiálně-axiální zatížení - hlavně v provedení bez reduktoru. Používají se valivá válečková a kuličková ložiska, jejich výhoda, oproti kluzným - používaným v řadových motorech - je mnohem snazší mazání a pak také úspora délky hřídele.

U hvězdicových motorů jsou dvě hlavní konstrukční řešení klikového hřídele. První řešení je nedělený klik. hřídel a tedy dělená hlavní ojnice 3.2. Toto řešení je konstrukčně jednodušší a hmotnostně úspornější 3.6. Druhé řešení je dělený hřídel a nedělená ojnice (obr. 3.7) [4, str. 144]. Způsob spojení částí hřídele v jednu je také dvojitý. Používá se drážkové spojení se středícími válcovými plochami nebo sevřené spojení rozříznutými rameny a šrouby - obr. 3.7 pohled *M* [4, str. 148].

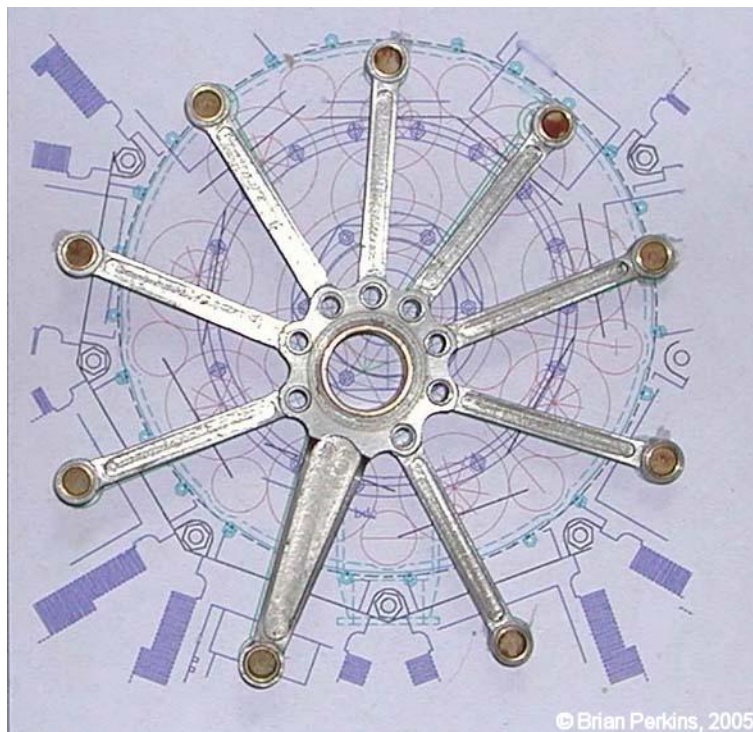
Polotovary pro výrobu je výkovek z legovaných ocelí, celý hřídel se přesně obrábí a vyvrtávají se otvory pro přívod oleje, které procházejí celým hřídelem a na povrch ústí mazací kanály a jsou dobře vidět na ojnicích čepech na obr. 3.6. Po obrábění se hřídel brousí a leští, čímž se hřídel zbaví všech nepatřičných hran, rysek apod., které mohou zapříčinit koncentraci napětí. Zvláštní zřetel musí být dbán na plynulost zaoblení. Součástí podstupuje kalení, popouštění a další tepelně chemické zpracování. Ojnicí čepy se zpravidla nitridují.



Obrázek 3.7: Klikový hřídel motoru Švecov AŠ-82 [4, str. 152]

### 3.2. Ojnice

Tato součást klikového mechanismu spojuje píst a klikový hřídel. U ojnice rozeznáváme ojniční oko pro připojení pístu pístním čepem, dále táhlo a nakonec ojniční hlavu pro uchycení ke klikovému hřídeli. U hvězdicových motorů nejsou jednotlivé identické ojnice, ale ojniční soustava skládající se z hlavní a vedlejší ojnice, obr. 3.8. Hlavní nevýhoda tohoto (avšak jediného použitelného) uspořádání je neregulární kinematika pístů v různých válcích a s tím spojené zvýšené zatížení hlavní ojnice [4, str. 129].



Obrázek 3.8: Ojniční sestava Bristol Aquila [15]



### 3.3. PÍST, PÍSTNÍ KROUŽKY A PÍSTNÍ ČEP

S délkou ojnice (osová vzdálenost ok) jsou spojeny dvě zásadní vlastnosti:

- a) přímá úměrnost velikostí boční síly působící na píst, resp. na stěnu válce dle poměru ku délce ojnice (obr. 3.1):

$$\lambda = \frac{N}{L} \quad (3.4)$$

- b) zvolení větší délky L nad nutnou míru má za následek nárůst hmotnosti a rozměrů celého motoru

Je zřejmé, že u letadlových motorů je druhý bod naprosto zásadní, a proto se volí délka ojnice co nejmenší možná.

Hlavní ojnice musí být uzpůsobená tak, aby bylo možno připojit všechny ojnice vedlejší, zároveň je nutné místo na kluzné ložisko a při tom všem si zachovat kompaktní rozměry a hmotnost nutnou pro minimalizaci setrvačných sil. Vedlejší ojnice jsou k hlavní připojeny nitridovanými čepy.

Jak je již zmíněno v kap. 3.1, hlavní ojnice může být dělená i nedělená. Dělená hlavní ojnice je konstrukčně složitější a těžší. Vždy se tedy volí řešení, které je v dané situaci vhodnější.

Ojnice se vyrábí většinou kováním v zápustkách a používá se legovaných ocelí, popř. hliníkových slitin. Nesmírně důležité je správná vzdálenost, souosost obou děr. Všechny přechody musí být plynulé a povrch je leštěn pro zamezení vzniku trhlin [2, str. 41].

Na ojnici působí periodicky se měnící síla K (3.1) v tlaku nebo v tahu, proto se kontroluje na toto zatížení a dále na mez únavy.

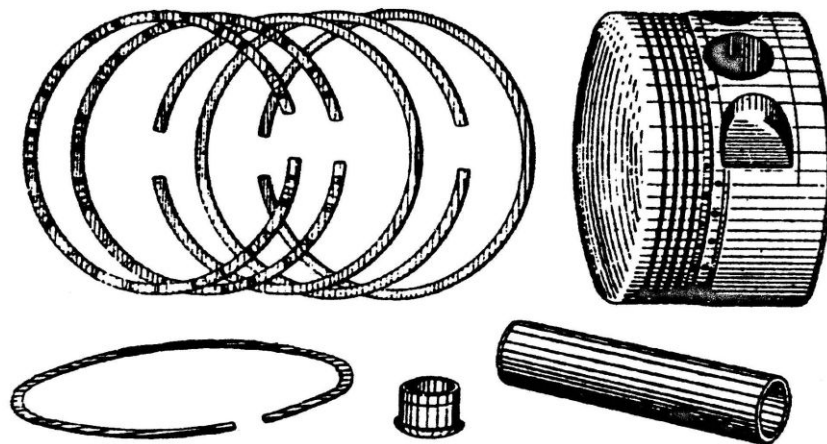
Zvláštní pozornost je třeba věnovat ojničnímu ložisku, jelikož to je jedna z nejvíce namáhaných a nejdůležitějších částí [4, str. 138] hvězdicového motoru. Používá se zásadně ložisko kluzné namísto valivého, které zabírá mnohem více prostoru a je těžší, tudíž by se museli náležitě zvětšit rozměry skříně a vznikaly by zde mnohem větší setrvačné síly.

Kluzné ložisko má ocelovou pánev, která je pokrytá tenkou vrstvou olovnatého bronzu ( $\approx 30\%$  olova) nebo stříbra, která se nanáší většinou až po uložení na místě, aby se předešlo deformaci třecí plochy. Pro zvýšení únosnosti se ložisko těsní tak, aby olej, dodávaný mazacími kanálky v hřídeli, nevytékal ven a udržoval se jeho stálý tlak. V případě tohoto řešení je velká výhoda v možnosti vytvořit mazací systém pro kluzná ložiska vedlejších ojnic, v určitých případech i bez dodatečných otvorů a kanálků. Ložisko může být v díře buď nalisované nebo uložené s vůlí, tzv. „plavmo“. Druhý způsob skýtá funkci samoustavení polohy, což je velice výhodné pro prodloužení životnosti ložiska, na druhou stranu je těžší zajistit v tomto případě správné mazání [4, str. 131].

### 3.3. Píst, pístní kroužky a pístní čep

Úplný píst se skládá z pístu, pístních kroužků, pístního čepu a jeho pojistek (obr. 3.9)

Sestava pístu letadlového motoru odděluje prostor klikové skříně a spalovací komory, proto je její těsnící schopnost nesmírně důležitá. Z válce nesmí unikát horké plyny do prostoru klikové skříně, kde by způsobily značný nárůst teploty, a tato netěsnost má i velký vliv na účinnost motoru. Naopak z klikové skříně nesmí do válce pronikat olej, který by zhoršoval dokonalost spalování a spálený olej by se usazoval v podobě „karbonu“ ve spalovací soustavě a ztěžoval činnost svíček [2, str. 39]. Toto vše je hlavní úkol



Obrázek 3.9: Kompletní sestava pístu [2, str. 39]

pístních kroužků. Píst samotný má za úkol přenášet sílu výbuchu na ojnici. Právě spojení pístu a ojnice zajišťuje pístní čep. Všechny součásti musí být velice přesně vyrobeny (obráběny) i smontovány, protože nepřesnosti jako velké rozměrové odchylky, nesouosost, špatná drsnost povrchu a další, značně snižují jak účinnost, tak hlavně spolehlivost a životnost jednotlivých součástek, potažmo celého motoru. Požadavky na píst jsou [4, str. 115]:

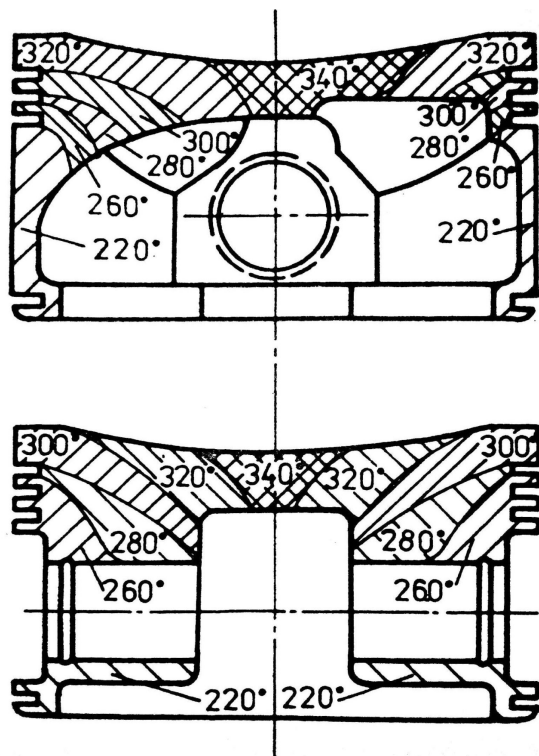
- a) spolehlivá těsnost ve válci oběma směry,
- b) pevnost a tuhost i pro stížené pracovní podmínky,
- c) dostatečný odvod tepla,
- d) malé opotřebení třecích ploch,
- e) s tím souvisí nízké tření na těchto plochách,
- f) nízká hmotnost válce - omezení setvračných sil na minimum.

### 3.3.1. Píst

Tato součást má tvar válcové nádoby s dnem vypouklým, rovným nebo vydutým nahoru - k válcové hlavě. V horní části jsou v plášti drážky pro pístní kroužky. Tato část pístu se nejvíce zahřívá, protože přímo přenáší tlak plynů na čep a tudíž je v kontaktu s horkými plyny. Její další úkol je přenášet co nejvíce tepla do stěny válce a tak ochlazovat celý píst, ale prostup tepla je značně zhoršen olejovým filmem na stěně válce. Spodní část pláště přenáší normálovou sílu  $N$  na stěnu válce. Celá horní plocha je přizpůsobená pro ideální průběh spalovacího cyklu, viz. obr. 3.10.

Tvar pístu bývá mírně kuželový, z důvodu rozdílných teplot [2, str. 39] a vyrábí se z výkovků lehkých, žáruvzdorných (nejčastěji hliníkových) slitin [4, str. 127]. Pevnostní výpočet kontroluje ohybový moment vyvolaný tlakem plynů na dno pístu.

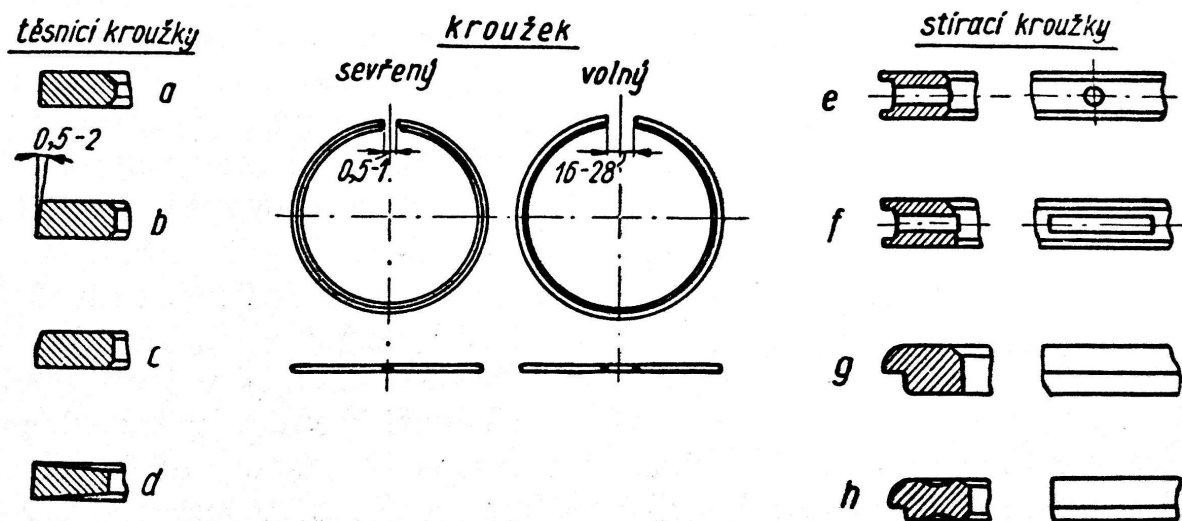
### 3.3. PÍST, PÍSTNÍ KROUŽKY A PÍSTNÍ ČEP



Obrázek 3.10: Rozložení teplot v pístu letadlového motoru [2, str. 39]

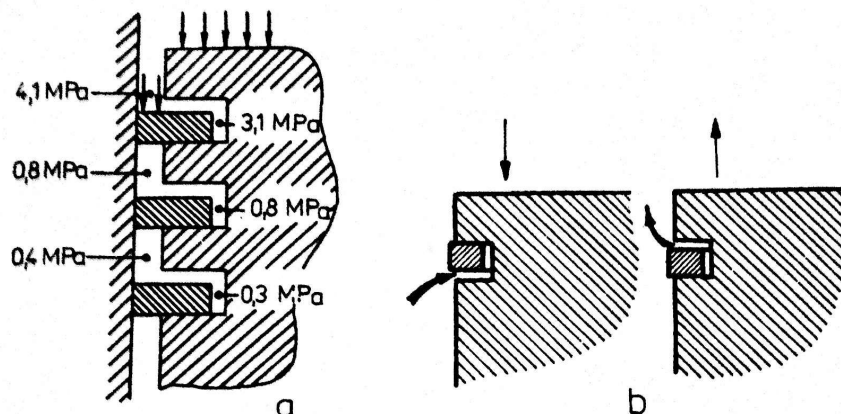
#### 3.3.2. Pístní kroužky

Kroužky se dělí na těsnící a stěrací. Těsnící zabraňují plynům opustit spalovací prostor (obr.3.12a), zatímco olej pouze „přečerpávají“ (obr.3.12b). Stěrací kroužky se starají o olej na stěně válce a vracejí ho zpět otvory do vnitřní dutiny válce, jak je vidět na obr. 3.13. Stěrací kroužky se liší v menší stykové ploše s válcem - to způsobuje větší stykový tlak. Po jeho obvodu jsou umístěny otvory pro odvod oleje. Také se volí menší vůle v uložení pístu než u těsnících kroužků [4, str. 116].

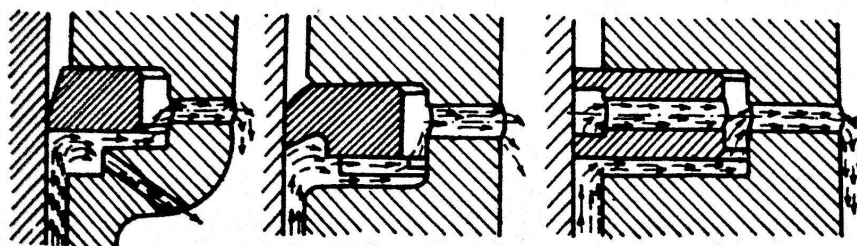


Obrázek 3.11: Tvary pístních kroužků používané v letadlových motorech [4, str. 115]

Průměr kroužků je větší než průměr válce a po nasazení se tedy vlivem pružnosti tlačí na jeho stěnu. Kroužky mají „zámek“ - přerušení pro umožnění montáže, je tedy jasné, že v tomto místě kroužek zcela neplní svoji funkci. Zámky se tedy při montáži nesmí dostat přímo pod sebe a musí se rozložit rovnoměrně po celém obvodu pístu.



Obrázek 3.12: Schéma činnosti těsnících kroužků [2, str. 40]



Obrázek 3.13: Schéma činnosti stěracích kroužků [2, str. 40]

U letadlových motorů bývají zpravidla 2 až 4 kroužky těsnící a 2 až 4 kroužky stěrací. Celkem bývá 5 až 6 kroužků, alespoň jeden stírací je umístěn úplně na spodním okraji pístu [4, str. 117].

Kroužky se vyrábí z perlitické šedé litiny, která má výhodně třecí vlastnosti a je odolná vůči vyšším teplotám [4, str. 127]. Pevnostní výpočet kontroluje ohyb, který vzniká při pružné deformaci kroužku.

#### 3.3.3. Pístní čep

Jak již bylo uvedeno, čep spojuje píst s ojnicí. Prochází otvorem v pístu, kde se opírá svými kraji a na jeho středě je navlečena ojnice. Čep je dutý a průměr díry se do středu zmenšuje. Uložení pístu může být tzv. „plavmo“ - čep se může otáčet jak oproti pístu, tak i oproti ojnici. Při pevném uložení se čep může otáčet pouze vůči jedné součásti. U hvězdicových motorů se používá takřka vždy uložení plavmo, čep je v tomto uložení rovnoměrněji opotřebováván [4, str. 117]. V axiálním směru se pojistí ččkami z měkkého kovu nebo pojistnými kroužky [2, str. 40].

Čepy se vyrábí z ocelí vhodných pro cementování nebo nitridování s tím, že nitridování bývá častější. Povrch čepu se pro minimalizaci opotřebení a zvýšení meze únavy navíc pečlivě brousí i leští.

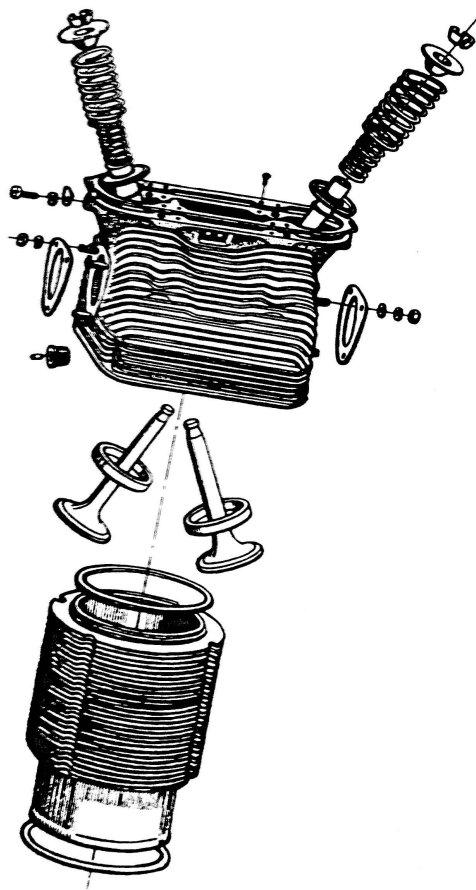


### 3.4. VÁLEC A HLAVA VÁLCE

Pevnostím výpočtem se čep kontroluje na ohyb, střih, maximální dovolenou deformaci (možnost vzpříčení čepu v pístu, či ojnici). Dále se počítá čep na mez únavy, vzhledem k periodickému zatížení součásti.

## 3.4. Válec a hlava válce

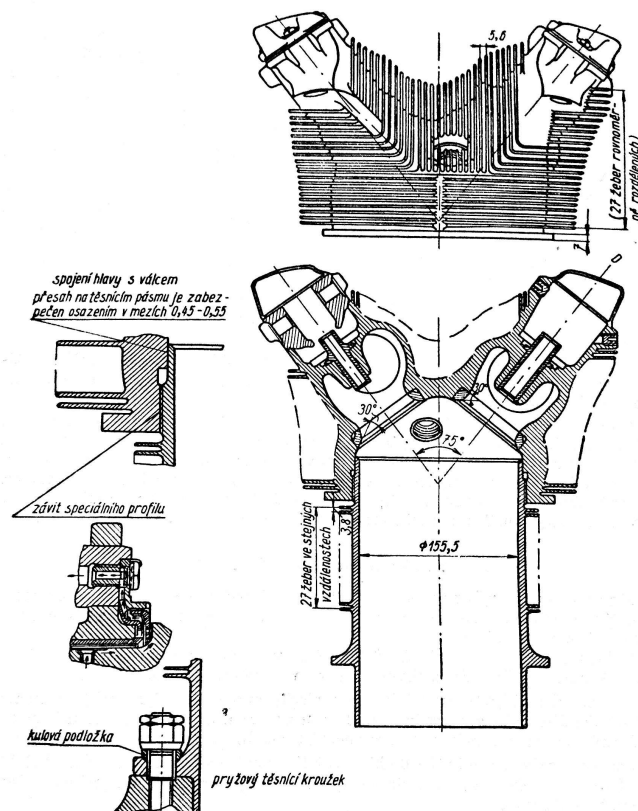
Válec spolu s hlavou tvoří lineární vedení pro píst, a s ním tvoří prostor spalovací komory. Tento prostor musí být těsný, to nejen ze strany pístu (kap. 3.3), ale i v místech mezi hlavou a válcem, v oblasti ventilů a také ve spojení válce s klikovou skříní. Válec s hlavou se musí vypořádat se značným tepelným a mechanickým zatížením.



Obrázek 3.14: Sestava vzduchem chlazeného válce [2, str. 39]

#### 3.4.1. Chlazení kapalinou

Hvězdicové motory chlazené kapalinou se prakticky nepoužívají, hlavně kvůli složitější a těžší konstrukci jak válců, tak i celého chladicího systému, proto je zde jen zmínka o této variantě. V tomto případě jsou válce spojeny a mají společnou hlavu i plášť - jsou spojeny v tzv. blok válců. Dříve (do roku 1935) se ještě používalo samostatných válců s přivařeným tenkostěnným vodním pláštěm [4, str. 100].



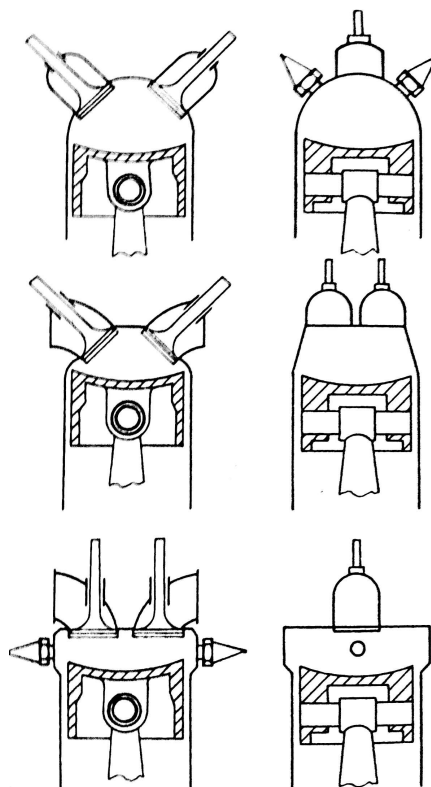
Obrázek 3.15: Sestava vzduchem chlazeného válce Švecov AŠ-82[4, str. 110]

### 3.4.2. Chlazení vzduchem

Nejvíce používaná konstrukce hvězdicového motoru. Chlazení je realizováno pomocí omývání ohříváných součástí proudem vzduchu. Každý válec s hlavou je samostatný a přimontován ke klikové skříni je nejčastěji závrtnými šrouby nebo svorníky a pomocným tvarovým stykem s klikovou skříni (drážka, zahlbubení ve skříni) a spojení s hlavou je realizováno stejně. Celý válec a hlavu pokrývá bohaté žebrování pro maximalizování teplosměnné plochy, zejména v kritických, nejvíce tepelně zatížených místech. Na obr. 3.14 vidíme kompletní sestavu válce i s částmi rozvodů.

Hlava válce je poměrně složitá součást, která je značně namáhána tepelně i mechanicky, protože tvoří hlavní část spalovacího prostoru. Tepelné namáhání je způsobeno velikou nerovnoměrností rozložení teploty v hlavě. Největší teploty jsou ve výfukovém kanálu, který se narozdíl od sacího neochlazuje čerstvou směsí v průběhu cyklu a ve spoji mezi ventily, kde je umístěna svíčka. Dostatečné chlazení hlavy zvyšuje součinitel plnění (snížení ohřívání vnikajícího vzduchu) a snižuje náchylnost k detonacím. Proto je důležitá volba materiálu s co nejlepší tepelnou vodivostí. Nejvíce se používají hliníkové slitiny, jednak pro dobrou tep. vodivost a také pro dobré lití vlastnosti. To dovoluje vyrobit složitý odlitek s bohatým žebrováním a správnými tvary kanálů, což u dříve používané oceli nebylo zcela možné.

Tvar spalovacího prostoru by měl umožnit dosáhnout co největšího součinitele plnění [4, str. 101]. Na obr. 3.16 jsou vidět nejčastější varianty používané u letadlových motorů.



Obrázek 3.16: Tvary spalovacího prostoru [2, str. 38]

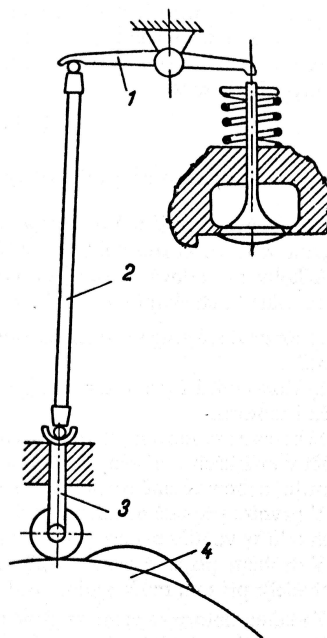
## 3.5. Rozvodové ústrojí

Rozvodová soustava se stará o správný chod ventilů vůči otáčení klikové hřídele, resp. chodu válců. Chod ventilů se řídí dle vačky, v případě hvězdicových motorů je to vačkový kotouč, který je pomocí ozubených kol spojen s rotací sousedního klikového hřídele v klikové skříni. Kotouč může být jeden nebo dva na hvězdicu, tedy pro každou skupinu ventilů jeden. Ovládání ventilů probíhá mechanicky pomocí soustavy tyčí, zdvihátek a vahadel. V některých motorech (zn. Bristol) se používal šoupátkový rozvod, jenž má lepší účinnost, avšak za cenu složité konstrukce. To byl také důvod proč se nerozšířily více.

Na obr. 3.17 je vidět reálná sestava rozvodů, která ideově kopíruje schéma na obr. 3.17, na pohledu zepředu vpravo dole vidíme ozubená kola (1,2,3,4) pohánějící vačkový kotouč (6). Boční řez sestavou ukazuje uložení vačkového kotouče a převod pohybu vačky na přímočarý pohyb zdvihátkem (8) a poté přenos pohybu na tyč (9), která vede až k hlavě válce a ovládá vahadlo (10). To svoji kladičkou na konci stlačí výfukový ventil (je dutý a vyplněný sodíkem, více v další kapitole 3.5.1). Všiměme si důkladného zakrytování jak ovládací tyče tak i celého mechanismu vahadla, z důvodů snížení aerodynamického odporu a omezení vnějších vlivů na minimum.

### 3.5.1. Ventily a ovládání

Ventily se skládají z částí viz. obr. 3.19b. Výfukový ventil je nejvíce namáhán tepelně, proto se v některých případech dělá dutý a vyplňuje se sodíkem pro vylepšení chlazení (teploty na obr. 3.19a jsou orientační). Sací ventil se cyklicky ochlazuje čerstvou směsí vnikající do válce, pracuje při teplotách cca o 200 °C nižších. Ventily se vyrábějí ze



Obrázek 3.17: Schéma ventilového rozvodu hvěz. motorů [4, str. 230]

1 - vahadlo, 2 - rozv. tyč, 3 - zdvihátko, 4 - vačkový kotouč

žáruvzdorných legovaných ocelí s příměsí wolframu, niklu a chrómu [2, str. 44]. Dřík ventilu se může nitrizovat. Pružiny jsou z důvodu spolehlivosti na ventilu dvě, protože musí zabezpečit dostatečnou sílu pro vrácení ventilu tak, aby následoval dráhu vačky. Zdvihátka zajišťují kontakt mezi vačkou a tyčí, na vačkovém konci mají kladečku pro hladší běh, na druhém konci je vytvořeno lůžko, do kterého zapadá konec tyče. Nakonci je vahadlo, které přenáší pohyb na ventil. Zde je důležitý mechanismus pro seřizování vůle dotyku vahadla a dříku ventilu. Ta se musí nutně dodržovat a kontrolovat, jelikož značně ovlivňuje hladkost běhu motoru.

### 3.5.2. Vačky a časování

Časování zdvihů je ovládáno otáčkami a počtem vaček na kotouči, většinou se zpřevoduje do stejného smyslu otáčení jak hřídel. Pak platí, že počet vaček na kotouči bude:

$$k = \frac{i + 1}{2} \quad (3.5)$$

Potom otáčky  $n_k$  kotouče musí být:

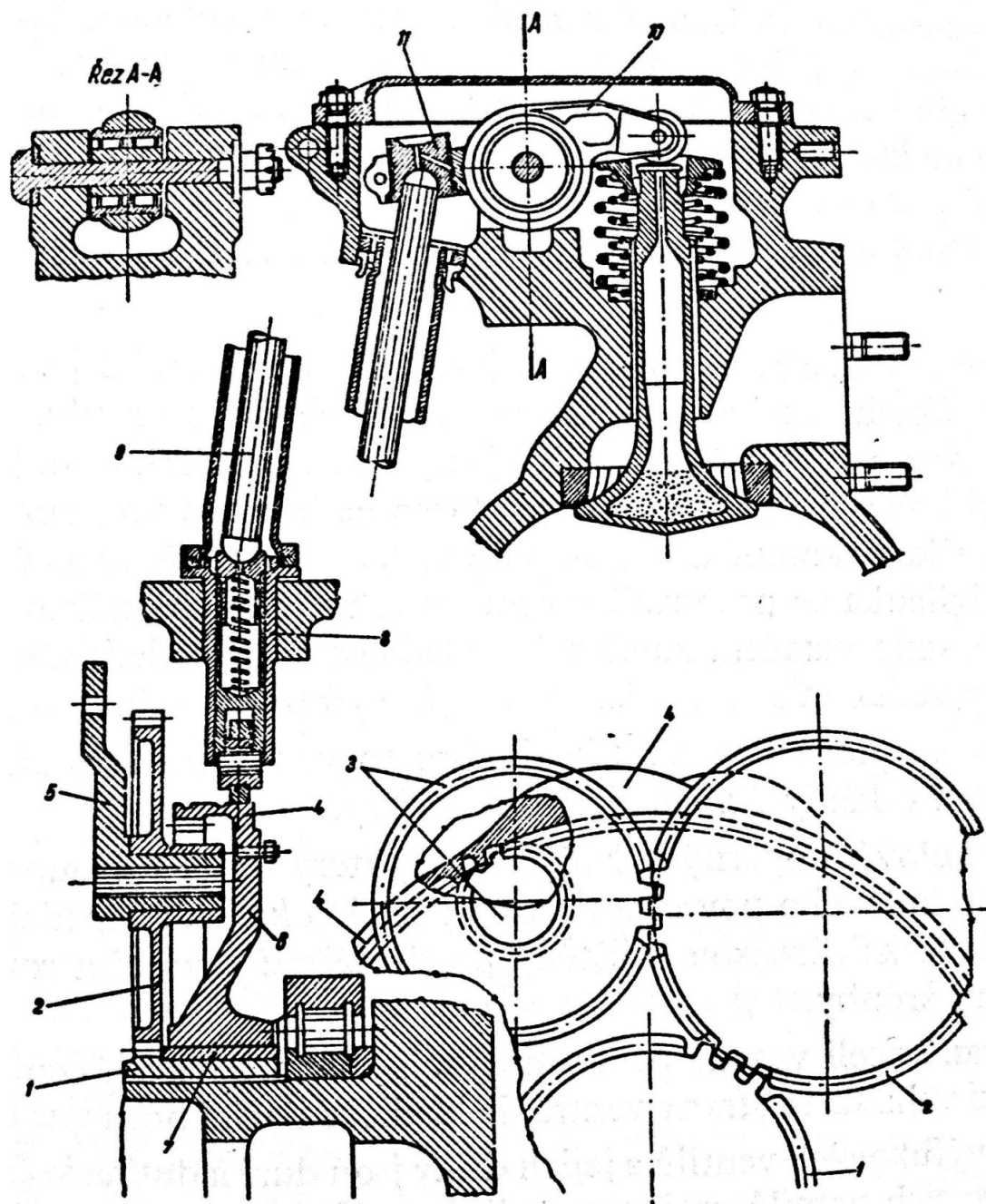
$$n_k = \frac{n}{i + 1} \quad (3.6)$$

V případě zpřevodování v protisměru otáčení klikové hřídele platí „opačné“ rovnice:

$$k = \frac{i - 1}{2} \quad (3.7)$$

Otáčky  $n_k$  kotouče musí být:

### 3.5. ROZVODOVÉ ÚSTROJÍ

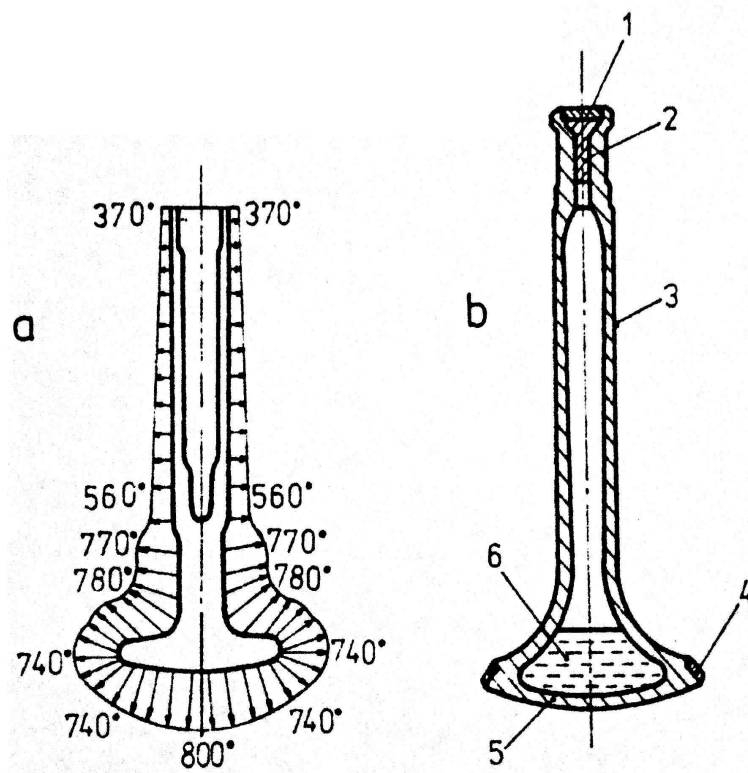


Obrázek 3.18: Ventilový rozvod motoru Švecov AŠ-82 [4, str. 237]

1 - hnací oz. kolo, 2 - dvojité oz. kolo, 3 - dvojité oz. kolo, 4 - oz. kolo a věnec, 5 - držák vložené oz. kola, 6 - váčkový kotouč, 7 - bronzové pouzdro, 8 - zdvihátko, 9 - rozvodová tyč, 10 - ventilové vahadlo, 11 - opěrná miska vent. vahadla

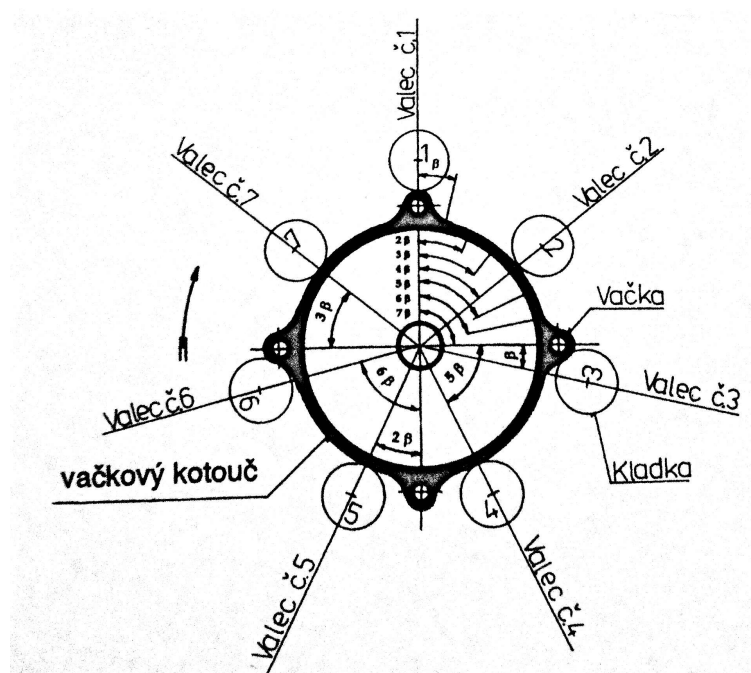
$$n_k = \frac{n}{i - 1} \quad (3.8)$$



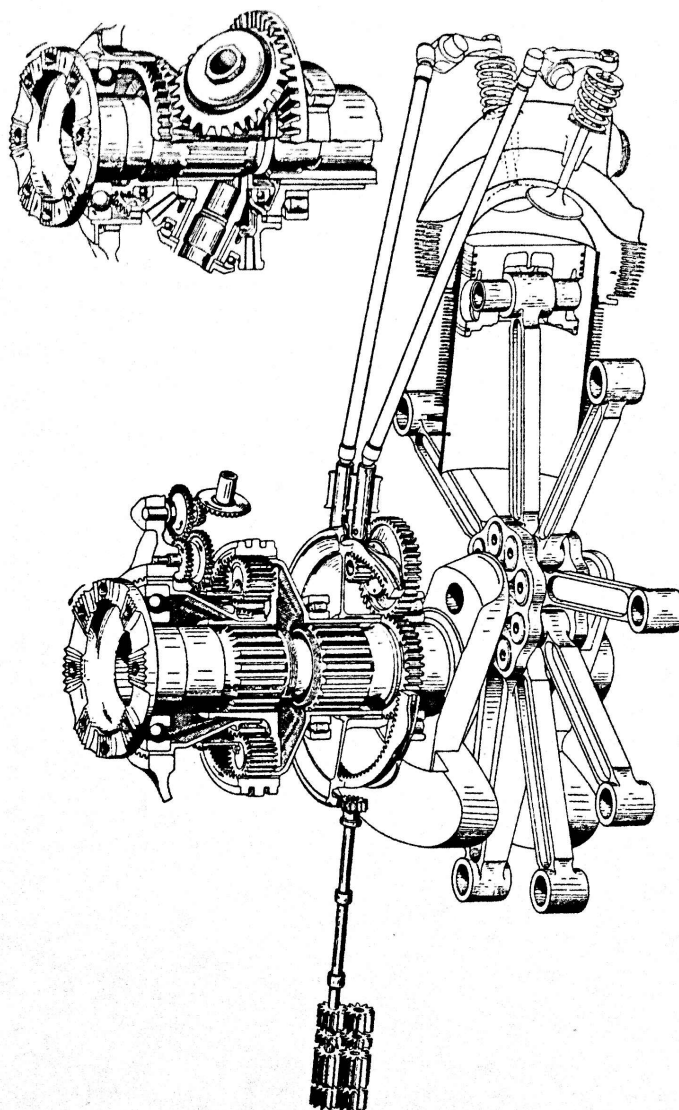


Obrázek 3.19: a) Rozložení teplot ve výfukovém ventilu, b) řez chlazeným výf. ventilem [2, str. 44]

1 - čelo dříku, 2 - zátka, 3 - dřík ventilu, 4 - dosedací plocha, 5 - talíř ventilu, 6 - sodík



Obrázek 3.20: Vačkový kotouč [2, str. 44]

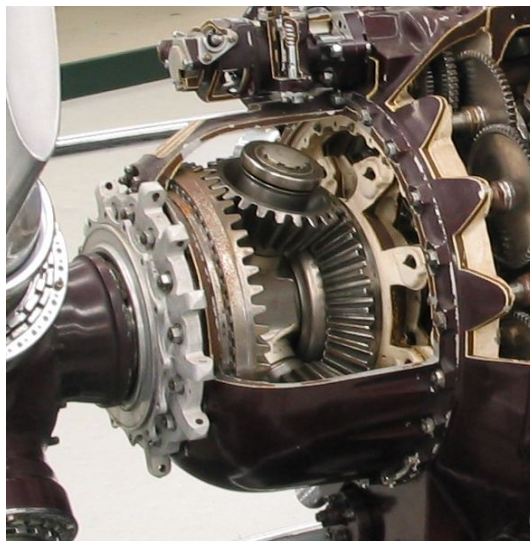


Obrázek 3.21: Názorný 3D pohled na rozvody a reduktor [2, str. 43]

## 3.6. Reduktor

Je soustava ozubených kol, která zajišťuje snížení otáček vrtulového hřídele na optimální. Toto zařízení je třeba až u pokročilejších (novějších) motorů, které dosahují již moc vysokých otáček na výstupu. U motorů s nižšími otáčkami se reduktoru nevkládá, např. motory pro lehká nebo školní letadla. Ideální otáčky pro vrtuli jsou zhruba v intervalu  $1000 - 1600 \text{ min}^{-1}$ . Reduktory tak mívají převod  $1 : (0,35 - 0,8)$ . Reduktor musí zachycovat axiální sílu od vrtule, kterou jinak zachytává radiálně-axiální ložisko klik. hřídele, a tomu musí odpovídat volba ložisek. Reduktory jsou buď s čelními nebo kuželovými koly (obr. 3.21 vlevo střed, resp. vlevo nahoře) a dále se dělí na sousosé a nesousosé. Konstrukce sousosých reduktorů je pomocí planetového převodu, v tom případě se vrtule otáčí stejným směrem jako hřídel. Provedení s čelními koly klade dodatečné požadavky na přesnost uložení/souososti jednotlivých kol. U hvězdicových motorů se v drtivé většině používá sousosý reduktor. Po vysoce výkonné motory (zhruba 4000 HP a výše) už je problém s přenosem výkonu na vrtuli při její dostatečné účinnosti. Tento problém se řeší dvěma vrtulemi za sebou, dutý hřídel pro jednu vrtuli a procházející plný pro druhou.

Zpřevodované jsou pro otáčení proti sobě, čímž se ruší jejich reakční krouticí momenty a výsledná účinnost je vyšší než při jedné obrovské vrtuli. [4, 223].



Obrázek 3.22: Reduktor s kuželovými koly v motoru Bristol Hercules [17]

Nesousý je realizován dvojicí čelních ozubených kol (přímé nebo šípové ozubení). Výhoda tohoto řešení je posunutí osy vrtule výš od země, ale používá se většinou u řadových motorů. Obecná nevýhoda reduktorů je jejich hmotnost a vzniklé mechanické ztráty v soukolí [2, str. 44-45].

Samotný hřídel je zatížen gyroskopickým momentem vrtule, krouticím momentem, ohybovou silou kola reduktoru, vahou vrtule, tahem vrtule a vlivem nevyváženosti vrtule. Hřídel se vyrábí ze stejného jako klikový (3.1.3). Ozubená kola a další součásti se vyrábí z legovaných ocelí vysoké pevnosti [4, str. 228 - 229].

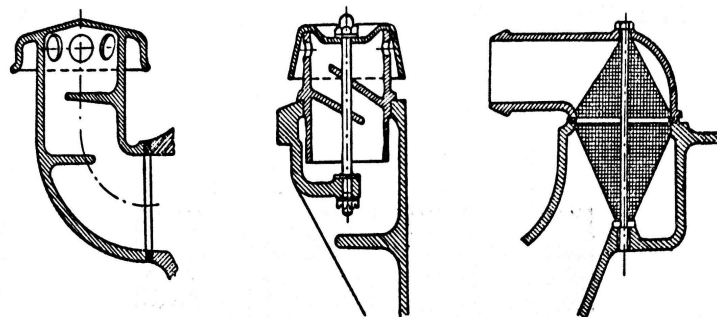
### 3.7. Kliková skříň a motorové lože

Největší část motoru, která „drží vše pohromadě“. Jsou na ni uchyceny všechny válce a přes ložiska klikový hřídel, potažmo reduktor a všechny pomocné agregáty a zařízení. Přes klikovou skříň je motor pomocí lože upevněn k rámu celého letadla. Skříň je namáhána opačně než hlavy válců stejnou silou (od tlaku plynů), dále přenáší reakční krouticí moment a setrvačné síly pohybujících se součástí.

Skříň je velká a poměrně komplikovaná, takže se pro usnadnění montáže vyrábí dělená kolmo k ose otáčení přepážkami a spojuje se svorníky nebo závrtnými šrouby. V těchto přepážkách se nacházejí hlavní ložiska klikového hřídele. Ložiska se ještě můžou nalisovat do ocelového pouzdra a poté teprve do přepážky, tímto způsobem se sníží riziko zadření ložiska z důvodů různé tepelné roztažnosti materiálů. Vyjimku tvoří jednovězdicové motory s nízkým výkonem, kde skříň bývá vcelku. Hlavní, nosná část přenáší namáhání od klikového mechanismu, ostatní části jsou určeny pro reduktor vpředu a dmychadlo s pomocnými agregáty vzadu [2, str. 42]. Všechny letadlové motory mají tzv. „suchou“ klikovou skříň, to znamená, že olej stékající po stěnách se odsává olejovými čerpadly do nádrže. Pro vyrovnání tlaků s vnějším prostředím se do skříně umísťují odvětrávače (obr.3.23), někdy se umísťují i do více sekcí zaráz.

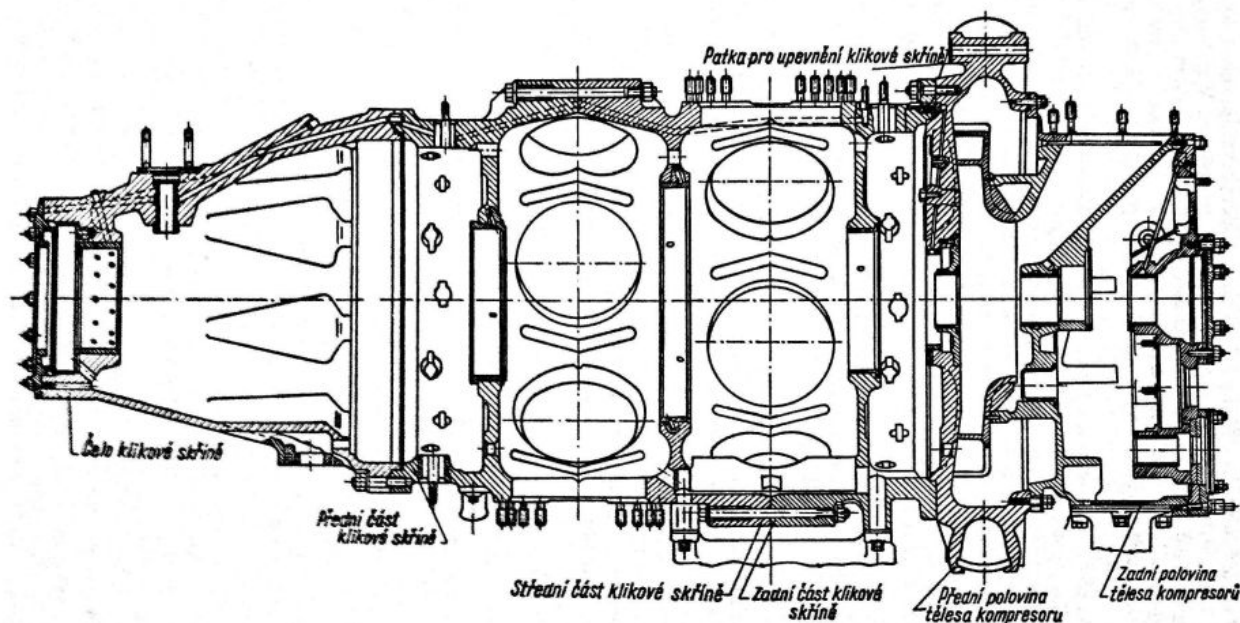


### 3.7. KLIKOVÁ SKŘÍŇ A MOTOROVÉ LOŽE



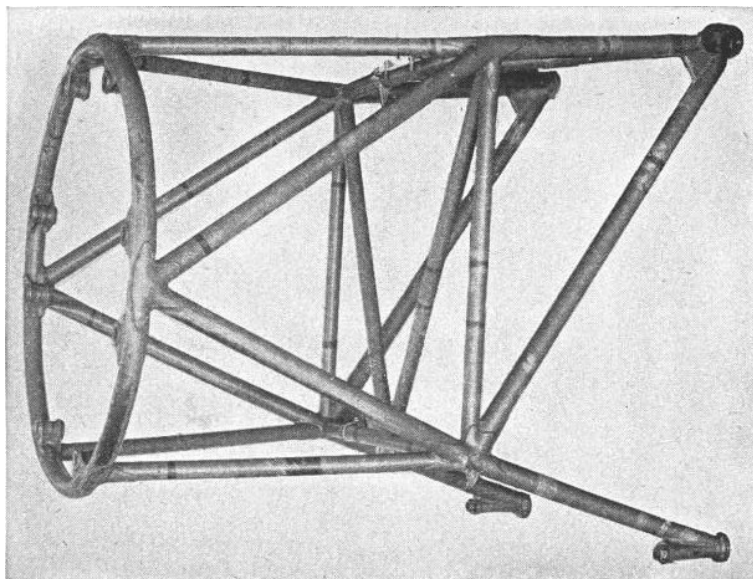
Obrázek 3.23: Odvětrávače [4, str. 206]

Přichycení k loži je řešeno vytvořenými otvory na zadní části klikové skříně, většinou kompresorová část hned za válci (obr. 3.24 nahoře). Počet ok by měl odpovídat násobku válců v jedné hvězdě. Lože se vyrábí jako svařovaná konstrukce z ocelových (někdy použity nosníky z hliníkových či horčíkových slitin) profilů (obr. 3.25). Pro uložení se používá tlumičů pro snížení vlastní frekvence pohonné jednotky. Tlumiče se montují v uchycení motoru do lože nebo v místech styku lože a konstrukce letadla, popř. kombinace těchto variant [2, str. 59].



Obr. 333. Kliková skříň motoru AŠ - 82.

Obrázek 3.24: Kliková dělená skříň [4, str. 209]



Obrázek 3.25: Lože hvězdového motoru [6]

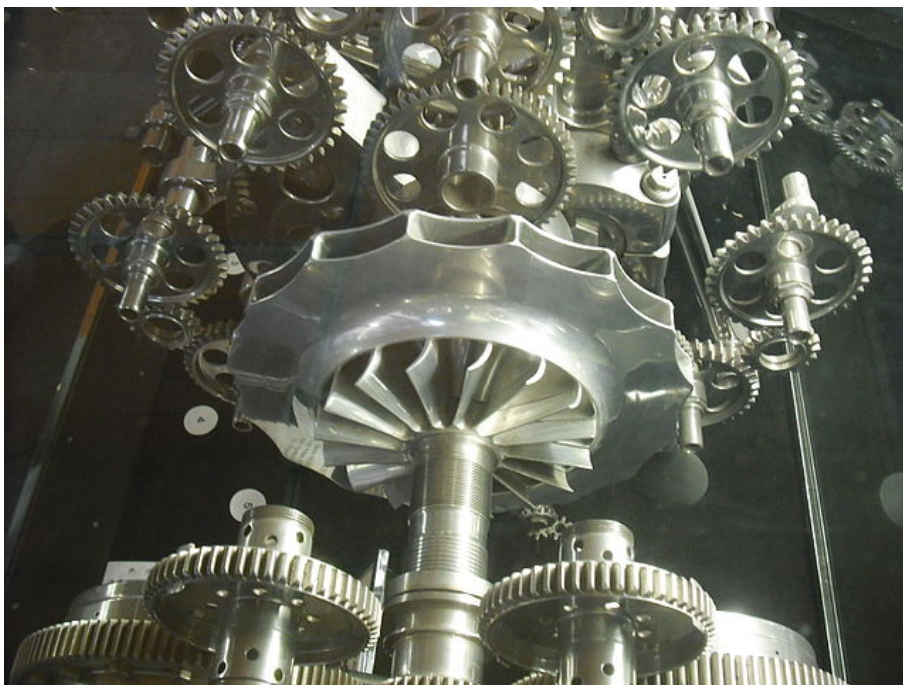
Materiál použitý pro nosnou část je výkovek nebo odlitek z lehkých slitin (hliníkových, horčíkových) nebo z oceli. Ostatní části jsou z též z lehkých slitin. Kliková skříň se obrábí „na dvakrát“, nejdříve každá část samostatně, hrubování, frézování a soustružení otvorů. Poté se celá skříň smontuje a obrábí se znovu, hlavně navazující povrchy, např. otvory pro hlavní ložiska nebo dosedací plochy. Je třeba dosáhnout těsnosti celé skříňe ve spojích a vyvarovat se vniknutí nečistot v průběhu montáže.

## 4. Pomocné agregáty a soustavy

Tato kapitola se bude zabývat rozбором pomocných soustav, které jsou nezbytné pro chod a řízení motoru. Máme 3 hlavní skupiny [4, str. 255-256]:

- a) agregáty pro zabezpečení práce motoru - magneta, kompresory, palivová čerpadla,
- b) ústrojí pro usnadnění řízení motoru - otáčkoměry, teploměry, regulátor otáček,
- c) agregáty nutné pro obsluhu a provoz letadla - elektrické generátory.

Ovládání motoru za letu je velice důležité, jelikož se neustále mění pracovní podmínky a potřeby. Některé věci musí ovládat pilot sám, můžou mu pomáhat poloautomaty, některé procesy mohou být i automatické.



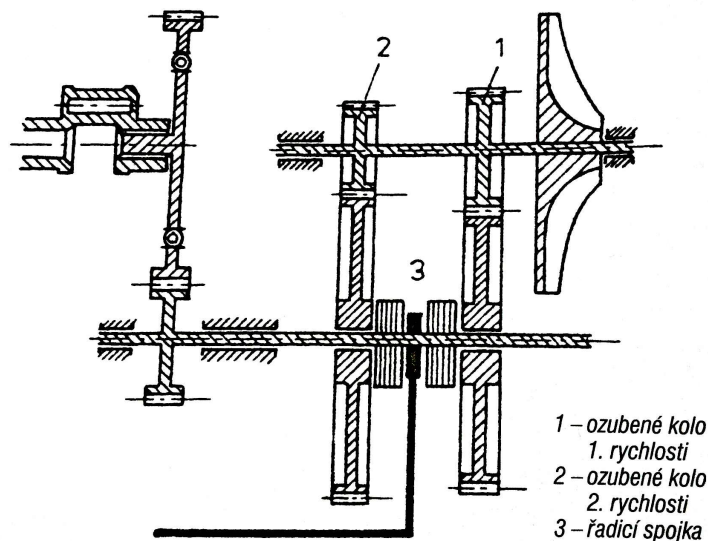
Obrázek 4.1: Kompresor s ozubenými koly pro pohon agregátů [19]

Z tohoto hlediska je velice zajímavé řešení v motoru BMW 801 (rok 1939), tzv. „kommandogerät“ - hydraulicko-mechanická ovládací jednotka motoru, která samočinně ovládala bohatost a množství směsi, zapalování, nastavení vrtule a otáčky kompresoru, vše v závislosti na poloze jedné plynové páky. Ostatní motory v té době většinou měly zautomatizované ovládání jednotlivých částí, avšak mezi sebou nebyly funkce provázány [1, str. 26].

### 4.1. Kompresor

Hlavní část kompresoru je skříň, skládající se z vstupní části, difuzoru, sběrače a samotné skříně, druhá hlavní část je kolo. Většinou se používají dvoustupňové kompresory. Pro maximální výškovost se dá použít i turbokompresor, ale ten nebývá už tak běžný.

Otáčky kompresorů dosahují až  $30\,000\text{ min}^{-1}$ , je třeba zpřevodovat v poměru 1 : (8 - 15) vůči klik. hřídeli. Proto se u hvěz. motorů používá předlokový hřídel, poskytuje



Obrázek 4.2: Schéma řazení dvoustupňového kompresoru [4, str. 264]

to výhody oproti přímému převodu, namáhání se rozloží na více oz. kol, jde navrhnout kompresor souose s klik. hřídelem a ušetří se více místa, mechanismus je kompaktnější [4, str. 261]. Dvoustup. kompresor je poháněn ozubeným převodem a vybaven řadicí spojkou [2, str. 46]. Samotná konstrukce dvoustupňového kompresoru obsahuje pružnou spojku v oz. kole na klikovém hřídeli pro eliminaci rázů, obr. 4.2.

## 4.2. Mazací soustava

Dostatečné mazání je nezbytné pro chod motoru. Kromě snížení tření olej odvádí teplo, ohřívá karburátor, slouží jako hydraulická kapalina pro pomocné agregáty.

Vnitřní soustava mazání rozlišuje mazání tlakové, to se týká nejvíce namáhaných ploch, např. ojnicích ložisek 3.2. Musí být vytvořeny mazací kanály, v tomto případě v klikovém hřídeli, viz. 3.1.3.

Soustava se skládá z olejové nádrže, olejového čerpadla, čističe oleje a vedení oleje. Olej se v třecích plochách dostává ven a je rozstřikován po skříní (druhý způsob mazání). Veškerý steklý olej je usměrněn do sběrače a odtud zpět k čerpadlu, obr. 4.3. Čerpadlo má 2 části - tlakovou a odsávací. Používá se většinou zubového čerpadla, s ohledem na jeho jednoduchou konstrukci a malé rozměry [4, str. 314].

Vnější část soustavy obsahuje (obr. 4.4) chladič, odlučovač - zde se zpěněný olej zbaví vzduchu, nádrž, čističe a kohouty, ventily. V důležitých místech jsou měřidla tlaku a teploty. Soustava je napojena na palivovou jedním ventilem, pro míchání oleje s palivem, používá se při nízkých teplotách [2, str. 50].

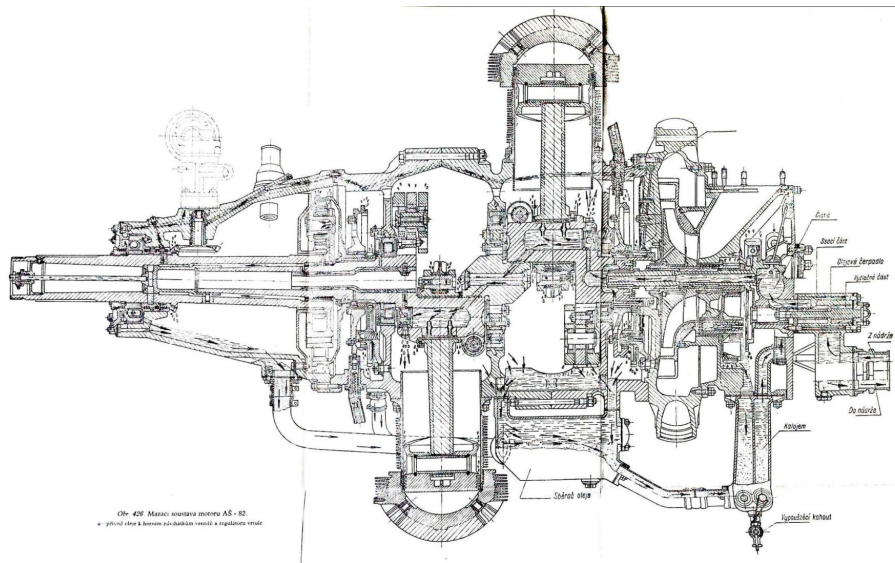
Používají se minerální oleje s aditivy.

## 4.3. Chladicí soustava a kryty motoru

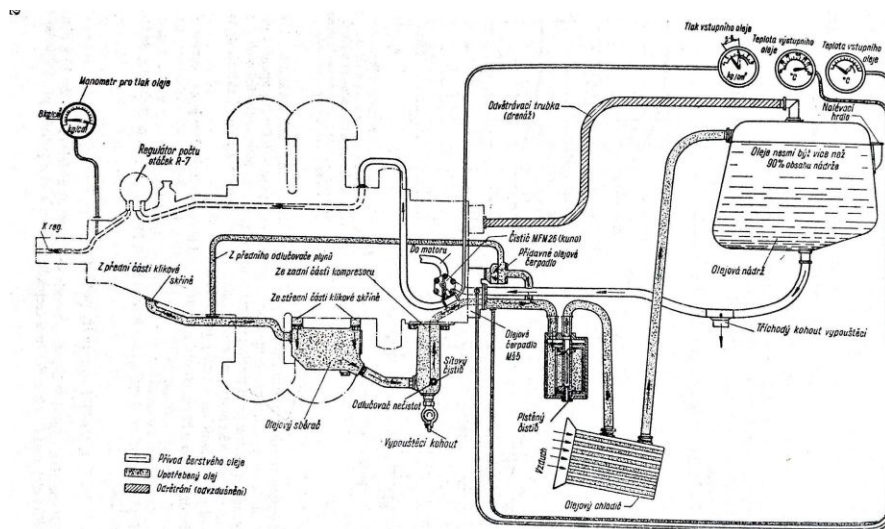
U hvězdicových motorů se chladí převážně vzduchem, takže tato soustava se skládá z čidla na svíčke válce, krytů motoru 4.5 a válců pro usměrnění toku vzduchu 4.7.



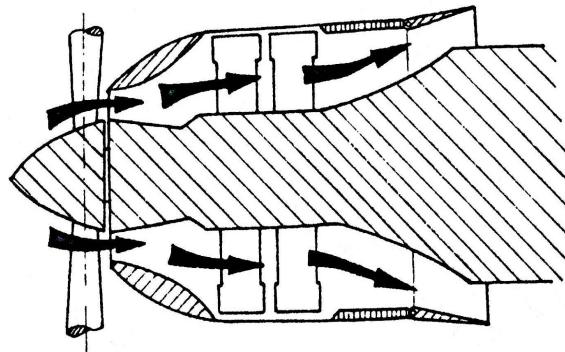
### 4.3. CHLADICÍ SOUSTAVA A KRYTY MOTORU



Obrázek 4.3: Řez vnitřní mazací soustavou [4, str. 304]

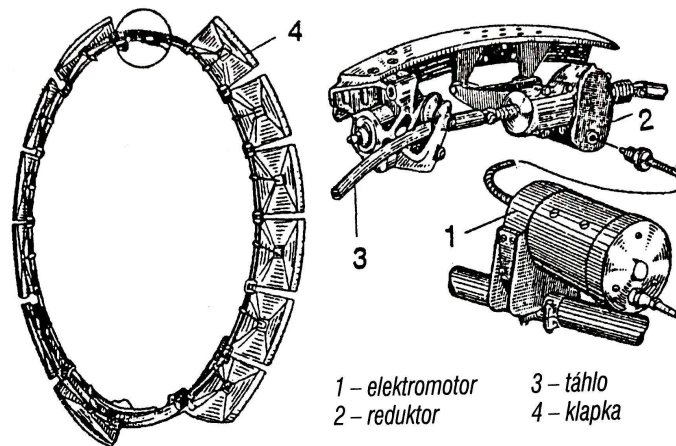


Obrázek 4.4: Vnější mazací soustava [4, str. 312]



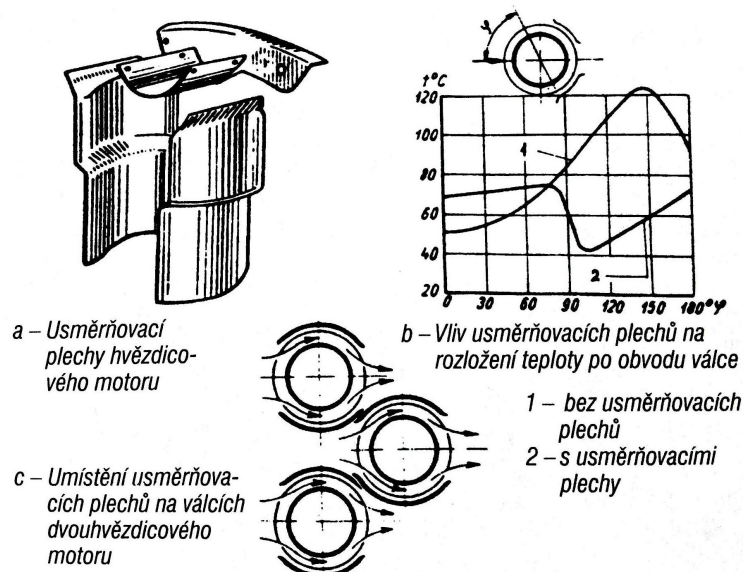
Obrázek 4.5: Usměrnění proudění vzduchu aerodynamickými kryty [2, str. 47]

Dále bývá před motorem umístěna soustava klapek pro regulaci proudu vzduchu, obr. 4.6.



Obrázek 4.6: Regulační klapky přívodu chladícího vzduchu [2, str. 48]

Pro hvězdicové motory ve vrtulnicích se používá nucený oběh vzduchu pomocí ventilátoru. [2, str. 48].

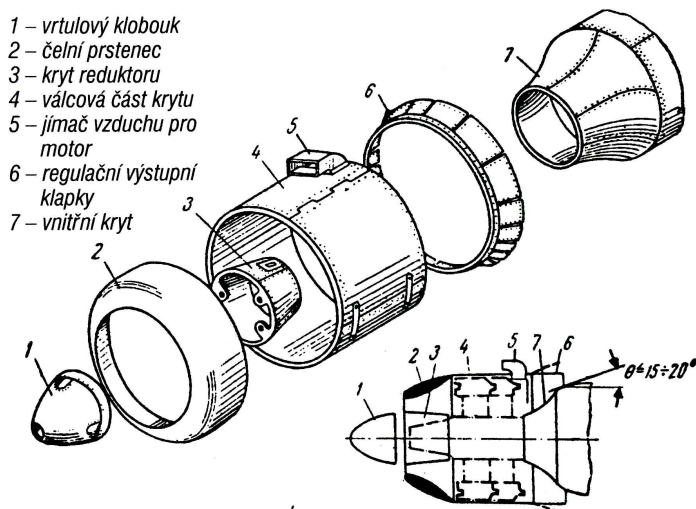


Obrázek 4.7: Usměrnování plechy - deflektory [2, str. 47]

U chlazení kapalinou je v motoru uzavřený okruh s vodním čerpadlem, chladičem. Používá se hlavně u řadových motorů velkých výkonů.

Kryt motoru musí zajistí hladký přechod na trup letadla, minimalizovat aerodynamický odpor a musí umožnit snadný přístup k motoru.

#### 4.4. PALIVOVÁ SOUSTAVA



Obr. 162b Motorový kryt hvězdicového motoru

Obrázek 4.8: Kryt hvězdicového motoru [2, str. 60]

### 4.4. Palivová soustava

Stará se o dopravu a míchání palivové směsi. Nakládání s palivem musí být spolehlivé pro hladký běh motoru a bezpečnost obsluhy a hospodárné. Celá soustava musí pracovat v souladu s otáčením klikového mechanismu. Další požadavky jsou:

- správná bohatost směsi pro okamžité podmínky,
- palivo musí být dodáno tak, aby se do konce komprese úplně odpařilo,
- vytvoření stejnorodé směsi v válci,
- do všech válců musí být dodávána totožná směs,
- řízení míchání směsi by mělo být co nejvíc automatizováno,
- rychlé reakce soustavy na prudké zvýšení a snížení otáček,
- spolehlivost, snadná obsluha a údržba,
- schopnost dodávat palivo ve všech stavech a polohách do kterých se letadlo dostane,
- rozměry a váha soustavy co nejmenší.

Soustava se dělí na vnější (v draku letadla) a vnitřní na a v motoru. Vnější soustava se skládá z nádrže, čističe, pomocného čerpadla, ventilů a měřících prvků. Vše je propojeno potrubím. Nádrže se vyrábí s lehkých slitin nebo umělých hmot. Potrubí z lehkých slitin, pouze v místech velkých vibrací jsou vloženy pryžové hadice [4, str. 297]. používají se lehká paliva - benzín.

#### 4.4.1. Karburátory

Zařízení, které dodává palivo v závislosti na pracovních podmínkách. Tvorba výbušné směsi probíhá již v sacím potrubí. Používají se plovákové nebo membránové karburátory.

Při prudkém zvyšování otáček je třeba zařízení zvané vyrovnávací tryska, která vyrovnává velké rozdíly tlaků a udržuje správné složení směsi, která by jinak byla moc bohatá. Naopak při nízkých otáčkách rozdíl tlaků chybí a směs se stává chudou, zde se využívá tzv. volnoběžný systém [2, str. 52]. Další systém se jmenuje akcelerační pumpička a brání prudkému ochuzení směsi v případě rychlého otevření škrtící klapky. Při letu v různých výškách je potřeba upravovat směs, s výškou řídne vzduch. Úpravu směsi vzhledem k výšce zajišťuje výškový korektor. Karburátor se zpravidla v průběhu letu musí ohřívat olejem, jelikož má při tvorbě směsi tendence k ochlazování, v extrémních případech může i zamrznout. Pro letadla s dmychadlem se do soustavy zařazuje samočinný omezovač, který zajistí omezení vlivu dmychadla (tedy nárостu výkonu) v nízkých výškách [4, str. 357].

#### 4.4.2. Přímé vstřikování

Rozdíl oproti karburátoru je tvorba výbušné směsi probíhá pouze ve spalovací komoře. Palivo se vstřikuje pod tlakem a rozeznáváme dva systémy [2, str. 52-53]:

- a) nízkotlaké
- b) vysokotlaké

Nízkotlaké se používají u motorů s menšími výkony. Složení směsi se automaticky mění dle plnicího tlaku.

Vysokotlaké vstřikovací čerpadla se používají pro motory vyšších výkonů. Vysokotlaká čerpadla se skládají z několika čerpacích jednotek tvořených pístkem a válečkem. Vstřikovací tlak se pohybuje kolem 10 MPa.

Výhody přímého vstřikování oproti karburátorům jsou značné, a to přesnější dávky paliva, zvýšená bezpečnost, dodávka paliva ve všech polohách letounu bez přídavných zařízení, nehrozí zamrzání. Nevýhody jsou hmotnost, cena, větší výkonová náročnost, provozně náročnější [2, str. 55].

### 4.5. Zapalovací soustava

Po vstřiku a rozprášení směsi musí v horní úvrati pístu tato soustava vydat elektrický impuls pro zapálení směsi. Existují 2 způsoby získání vysokého napětí. První je vysoko-napěťové zapalování. Zde se dříve používala jako zdroj primárního napětí baterie, dnes je již všude magneto, zařízení, které slučuje všechny potřebné komponenty, viz obr. 4.9.

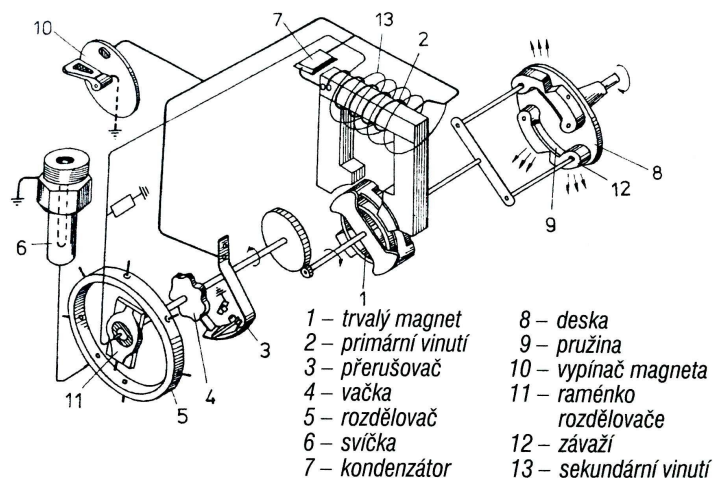
Druhý je vysokofrekvenční, a na rozdíl do prvního zapaluje směs pouze jednou jiskrou a svíčky se tolik neopalují. Pro usnadnění spouštění se používá zapalování bzučákem, při uvedení do provozu primární okruh napájí baterie a vzniká nepřetržitá série výbojů. Také se může použít odtrhávací spojka, která urychlí otáčení magneta na počátku a zajistí silnější jiskru. U letadlových motorů má každý válec 2 svíčky [2, str. 55].

### 4.6. Spouštěcí soustava

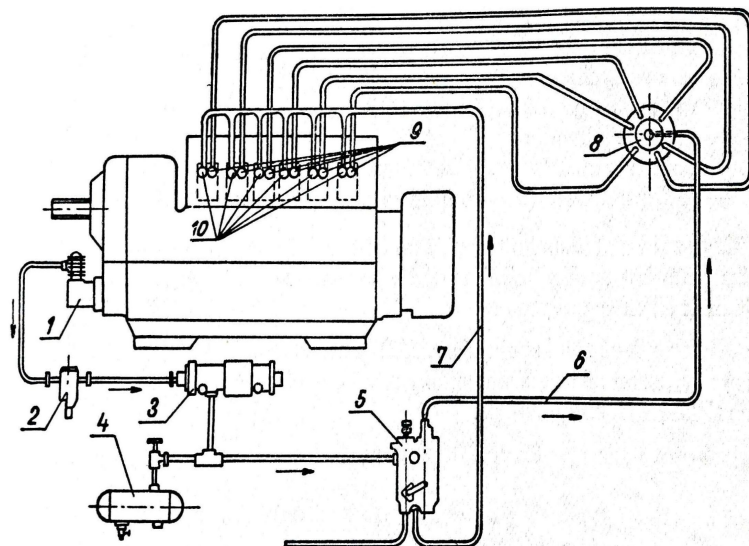
Vnější zdroj energie, který roztáčí klikový hřídel než se motor „chytne“. Dále uvádí do běhu pomocné agregáty. Běžně je třeba rozběhnout motor na  $100 - 150 \text{ min}^{-1}$ , avšak



#### 4.6. SPOUŠTĚCÍ SOUSTAVA



Obrázek 4.9: Schéma sestavy magnet [2, str. 56]



Obrázek 4.10: Vzduchová spouštěcí soustava [4, str. 270 ]

pro běh s vrtulí je třeba více,  $400 - 500 \text{ min}^{-1}$ , [4, str. 270]. Nejrozšířenější je vzduchový a elektrický spouštěč. Ten první funguje na principu vhánění stlačeného vzduchu (2-2,5 MPa) ve správném pořadí do válců a přes písty se udělí klik. hřídeli otáčky, obr. 4.10. Správné pořadí přívodu určuje rozdělovač. Tento způsob je použitelný u větších motorů s velkým počtem válců. Druhý způsob je elektrický, který se dále dělí na protáček a setrvačnickový. Protáček varianta má jako základ elektromotor s převodem dopomala. Otáčky takto získané jsou nízké, magneto musí být vybaveno zařízením pro usnadnění rozběhu. Existuje i varianta tzv. dynamo-spouštěče, kdy se po rozběhnutí motoru zařízení přepne na dynamo. Pro silné motory je určen setrvačnickový spouštěč. Setrvačnick se roztočí elektromotorem na vysoké otáčky, vypne se a setrvačnick se přes převod do pomala připojí ke klik. hřídeli, což způsobí protočení motoru, pak se opět odpojí. Tato varianta umožňuje i ruční obsluhu [2, str. 58].

## 4.7. Protipožární a odmrazovací soustava

Pasivní protipožární ochrana zahrnuje použití protipožární přepážky mezi motorovým prostorem a zbytkem letadla. Další opatření je kontrola těsnosti všech systémů. Důležité je vodivé spojení částí letadla, pro vyrovnaní náboje a zabránění statickým výbojům. Aktivní ochrana je indikační a hasicí soustava, která při detekci požáru zareaguje vypuštěním hasící látky.

Odmrazování motoru se koná pomocí horkým vzduchem, olejem nebo lihem. Ohřívá se plnicí soustava (zejména karburátor). Nejvíce námrazy se tvoří na vrtuli a ta se odmrazuje:

- a) chemicky - rozprášení liho-glycerinové směsi na listy vrtule
- b) elektrotermické - kovové vrtule se zahřívají el. proudem - topnými tělisky,
- c) tepelné odmrazovače - ocelové vrtule se, ohřívají výfukovými plyny.

## 5. Závěr

Úkol této práce byl shromáždit poznatky o možných konfiguracích hvězdicových motorů. V první řadě byly zpracovány teoretické poznatky a požadavky na motory důležité pro konkrétní aplikace dále rozebírané.

Byl zpracován historický přehled vývoje motorů, rozdělený do několika podkapitol. Je jasné vidět, že hvězdicové uspořádání bylo velikým milníkem v historii letectví. Bez něj by se rozvoj ať už civilního nebo vojenského dopravního letectví značně zpomalil. Jako vždy měla na vývoj motorů velký vliv válka a díky tomu se také vysloužilé stroje mohli použít pro civilní aplikace. Hlavní období rozvoje je jednoznačně 2. polovina meziválečného období a 2. sv. válka, kdy se těmto motorům věnovala velká pozornost a technický vývoj byl překotný. Poválečné období vycházelo z poznatků načerpaných dříve a „válečné“ motory sloužily pro civilní účely ať už přímo nebo jako inspirace pro nové motory. V dnešní době se tyto motory používají již minimálně, občas v průmyslových aplikacích, např. jako pohon čerpadel apod., ve větší míře pro modely letadel. Velký zájem vzbuzují u nadšenců restaurujících historické motory nebo celá letadla, sestřelená nebo jinak poškozená.

Hlavní částí této práce je věnována postupnému rozboru konkrétních hlavní soustav hvězdicových motorů, a to od klikového mechanismu přes ventilové rozvody až po mazací a pomocné soustavy. Každá jednotlivá soustava by se dala zpracovat na mnoho stran, a tak se stalo velkou výzvou všechny poznatky přehledně a výstižně zpracovat, s výjimkou pevnostních výpočtů, které by celou práci roztáhly do neunosné délky a rozbor pevnostních výpočtů není cíl této práce.

Poslední kapitola práce je věnována pomocným agregátům, které zajišťují nebo kontrolují funkce motoru. Tyto soustavy na první pohled zanedbatelné, ale při bližším zkoumání se ukazuje, že sestavy jsou velice složité, zejména mazací, a musí být pečlivě zkonstruovány.

Hlavním přínosem práce je shrnutí všech důležitých okruhů a konstrukčních celků do jednoho pojednání a tvoří ucelený přehled o motorech.

# Literatura

- [1] GUNSTON, Bill. World encyclopaedia of aero engines. Fully rev. 2nd ed. New York, N.Y.: Distributed by Sterling Pub. Co., 1989, 192 p. ISBN 1-85260-163-9.
- [2] KOCÁB, Jindřich a Josef ADAMEC. Letadlové motory. 1. vyd. Praha: Kant, 2000, 176 s. ISBN 80-902-9140-6.
- [3] MASLENNIKOV, M.M. a M.S. RAPIPORT. Letadlové pístové motory: 1. díl. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955, 354 s., příl.
- [4] MASLENNIKOV, M.M. a M.S. RAPIPORT. Letadlové pístové motory: 2. díl. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955, 419 s., příl.
- [5] SVITÁK, Pavel. Letectví a kosmonautika. Letadlové rotační motory. 2004, roč. 2004, č. 1, s. 60-66. DOI: 0024-1156.
- [6] Aircraft engines: Technical manual [online]. Washington, D.C.: War Dept., 1945, s. 75, 2.1.1945 [cit. 2013-05-22].
- [7] Pratt & Whitney. [online]. [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.pw.utc.com>
- [8] Flight Global: PDF Archive [online]. 1910 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: [http://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1910/1910\\_20-201077.html](http://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1910/1910_20-201077.html)
- [9] Palba.cz [online]. 2010-2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: [www.palba.cz](http://www.palba.cz)
- [10] YOKINGCO, C. Roy. Flickr [online]. 2010. vyd. [cit. 7.5.2013]. Dostupné z: <http://www.flickr.com/photos/nxtrfoto/6159352705/>
- [11] MONNIAUX, David. Wikipedia [online]. [cit. 7.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gnome\\_Delta\\_p1040425.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gnome_Delta_p1040425.jpg)
- [12] SVRBAN. Wikipedia [online]. [cit. 7.5.2013]. Dostupný na WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pratt\\_%26\\_Whitney\\_R-985\\_Wasp\\_Junior.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pratt_%26_Whitney_R-985_Wasp_Junior.jpg)
- [13] JONES, Lyndon. Inner Action [online]. [cit. 15.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://inter.action.free.fr/images/affiches/bmw801d.jpg>
- [14] GODIN, Gery. Blog Buickman2 [online]. [cit. 16.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://buickman2.files.wordpress.com/2012/02/close2bup2bof2bun-assembled2bcrank.jpg>
- [15] PERKINS, Brian. Engine history [online]. [cit. 17.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.enginehistory.org/ModelEngines/Perkins/Aquila/Crankrods1.jpg>
- [16] NEZNÁMÝ. Focke Wulf [online]. [cit. 21.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://www.focke-wulf190.com/images/bmw801schema.jpg>
- [17] HARRY. Wikipedia [online]. [cit. 21.5.2013]. Dostupný na WWW: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Bristol-hercules.east-fortune.jpg>

## LITERATURA

- [18] HENRIQUE, X. Wikipedia [online]. [cit. 23.5.2013]. Dostupný na WWW:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diagrama\\_pv\\_de\\_ciclo\\_4tempos.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diagrama_pv_de_ciclo_4tempos.png)
- [19] DINGLEY, Andy. Wikipedia [online]. [cit. 23.5.2013]. Dostupný na WWW:  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6d/Bristol\\_Centaurus\\_centrifugal\\_superchar  
-Bristol\\_Centaurus\\_centrifugal\\_supercharger.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6d/Bristol_Centaurus_centrifugal_supercharger-Bristol_Centaurus_centrifugal_supercharger.jpg)
- [20] DANIELS, John T.. Wikipedia [online]. [cit. 23.5.2013]. Dostupný na WWW:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:First\\_flight2.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:First_flight2.jpg)

## 6. Seznam použitých zkratek a symbolů

$R$	$[N]$	tah motoru
$G$	$[N]$	tíhová síla
$X$	$[N]$	odpor
$Y$	$[N]$	vztak
$F_R$	$[N]$	aerodynamická síla
$\dot{m}$	$[kg.s^{-1}]$	hmotnostní tok vzduchu
$c_1$	$[m.s^{-1}]$	rychlost vzduchu před motorem
$c_2$	$[m.s^{-1}]$	rychlost vzduchu za motorem
$i$	$[-]$	počet válců
$\gamma$	$[^\circ]$	zážehový úhel mezi válci
$\psi_V$	$[^\circ]$	úhel pootočení řad
$\psi_{k1}$	$[^\circ]$	úhel pootočení zalomení
$\lambda$	$[-]$	poměr
$N$	$[N]$	boční síla na válec
$L$	$[mm]$	délka ojnice
$K$	$[N]$	síla ve směru ojnice
$k$	$[-]$	počet vaček na kotouči
$n_k$	$[min^{-1}]$	otáčky vačkového kotouče
$n$	$[min^{-1}]$	otáčky klikového hřídele